А. П. Ложников
Е. К. Сонин

Каскодные усилители



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 423

А. П. ЛОЖНИКОВ и Е. К. СОНИН

КАСКОДНЫЕ УСИЛИТЕЛИ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД

СОДЕРЖАНИЕ

В книге изложены основные сведения об усилителях каскодного типа и их особенностях. Наряду с расчетными соотношениями приведена методика графического определения параметров и характеристик усилителей. Примеры практических схем показывают пути реализации особых свойств, присущих каскодным усилителям.

Целью книги является ознакомление подготовленных радиолюбителей с этим интересным классом схем.

6Ф2 *Ложников Анатолий Петрович*
и Сонин Евгений Константинович

Л71 Каскодные усилители, М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.
72 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 423)

6Ф2

Редактор *Е. Б. Гумеля* Техн. редактор *Н. И. Борунов*

Сдано в набор 11/VII 1961 г. Подписано к печати 13/IX 1961 г.
Т-10684 Бумага $84 \times 108^1/_{32}$ 3,69 печ. л. Уч.-изд. л. 4,4
Тираж 30 000 экз. Цена 18 коп. Зак. 395

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы все чаще на страницах радиотехнической литературы можно встретить термин «каскодный усилитель». В отличие от обычного усилительного каскада, образованного электронной лампой с пассивными схемными элементами, каскодный усилитель представляет усилительную схему, в которой две непосредственно соединенные лампы включены так, что через них протекает одна и та же переменная составляющая анодных токов. В такой схеме одна из ламп, работая усилителем, является одновременно и динамическим нагрузочным сопротивлением для другой лампы, что позволяет получить совершенно новые свойства усилителя: высокое входное сопротивление, высокое устойчивое усиление при малой величине собственных шумов и др.

Каскодные усилители имеют много разновидностей. Наиболее распространенным является усилитель, в котором два триода включены так, что один из них работает в схеме с заземленным катодом, а второй — с заземленной сеткой. Эта схема, которую мы примем за основную, обладает высоким усилением, близким к характерным для пентодных схем значениям, и низким уровнем собственных шумов — как в обычном триодном усилителе. Малая связь выхода усилителя со входом, получающаяся благодаря заземлению сетки второго триода, определяет высокую устойчивость усиления. Такие усилители широко применяются во входных каскадах усилителей высокой, промежуточной и низкой частоты и во многих других схемах.

В каскодном усилителе может быть легко введена частотнозависимая обратная связь, что позволяет создать применяемые на низких частотах избирательные каскодные усилители. В электронных стабилизаторах напряжения применяются каскодные узкополосные управляющие усилители с большим коэффициентом усиления.

Большими преимуществами по сравнению с обычными обладают построенные по каскодной схеме катодные повторители. Помимо высокого входного сопротивления в большом динамическом диапазоне и близкого к единице коэффициента передачи, каскодные катодные повторители обладают совершенно новыми для катодных повторителей свойствами — одинаково хорошей передачей как положительных, так и отрицательных перепадов напряжения, что определяет их широкое применение в импульсных устройствах.

В настоящей брошюре рассмотрены свойства и особенности различных каскодных усилителей приведены методика их расчета и некоторые практические схемы. При составлении брошюры широко использовались материалы, опубликованные как в отечественной, так и в зарубежной литературе.

Авторы

ГЛАВА ПЕРВАЯ

АНАЛИЗ И РАСЧЕТ КАСКОДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

1. ОСНОВНАЯ СХЕМА КАСКОДНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Наиболее характерной особенностью приведенной на рис. 1 схемы каскодного усилителя является непосредственное соединение анода первого триода $Л_1$, работающего в качестве усилителя с заземленным катодом, с катодом второго триода $Л_2$, сетка которого заземлена по переменному току через конденсатор C_1. Напряжение входного сигнала $U_{с1}$ подается на сетку триода $Л_1$. Анодной нагрузкой этого триода служит входное сопротивление со стороны катода лампы $Л_2$. Усиленное напряжение сигнала снимается с нагрузочного сопротивления $R_н$ в анодной цепи лампы $Л_2$. Как и в обычном усилителе, здесь в качестве анодной нагрузки может быть использовано как активное сопротивление, так и резонансный контур или трансформатор.

Рис. 1. Основная схема каскодного усилителя.

Необходимое напряжение смещения на сетку лампы $Л_2$ подается с делителя напряжения, образованного сопротивлениями R_1 и R_2. За счет постоянства потенциала на сетке лампы $Л_2$ изменения потенциала на катоде этой лампы ограничены. Следовательно, лампа $Л_1$ работает при почти постоянном анодном потенциале.

Это обстоятельство и создает условия для получения очень большого усиления на триодах, входящих в каскодный усилитель, близкого по величине к усилению, получаемому на пентодах. Применение триодов позволяет избежать такого существенного недостатка пентодного усилителя, как большой уровень собственных шумов.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАСКОДНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Для определения эквивалентных параметров каскодного усилителя используем уравнение для переменной составляющей анодного тока триода в линейном режиме:

$$I_{а\sim} = SU_{с.к\sim} + \frac{1}{R_i} U_{а.к\sim}, \qquad (1)$$

где $I_{а\sim}$ — переменная составляющая анодного тока;
$U_{с.к\sim}$ — переменная составляющая напряжения на участке сетка—катод триода;
$U_{а.к\sim}$ — переменная составляющая напряжения на участке анод—катод триода;
S — крутизна;
R_i — внутреннее сопротивление триода.

В соответствии с этим уравнением переменная составляющая анодного тока лампы $Л_1$ каскодного усилителя определяется выражением

$$I_{а1\sim} = S_1 U_{с1\sim} + \frac{1}{R_{i1}} U_{а1\sim}, \qquad (2)$$

а для лампы $Л_2$

$$I_{а2\sim} = S_2(-U_{а1\sim}) - \frac{1}{R_{i2}}(I_{а2\sim} R_н + U_{а1\sim}). \qquad (3)$$

Знак минус в первом слагаемом уравнения (3) означает, что сигнал приложен к катоду лампы $Л_2$; минус во втором слагаемом уравнения (3) получается потому, что выражение для напряжения $U_{а.к2\sim}$ лампы $Л_2$ имеет вид:

$$U_{а.к2\sim} = E_а - I_{а2\sim} R_н - U_{а1\sim}.$$

Напряжение анодного питания $E_а$ не имеет переменной составляющей и, следовательно, не оказывает влияния на переменную составляющую анодного тока триода. Это слагаемое можно опустить. Тогда выражение для $U_{а.к2\sim}$, подставляемое во второй член уравнения (3), приобретает вид:

$$U_{а.к2\sim} = -(I_{а2\sim} R_н + U_{а1\sim}).$$

Найдем из уравнения (2) значение $U_{а1\sim}$. В дальнейшем расчет ведется в предположении, что при всех изменениях входного напряжения сеточные токи обеих ламп отсутствуют. Вследствие этого $I_{а1\sim} = I_{а2\sim} = I_{а\sim}$, и можно записать:

$$U_{а1\sim} = I_{а\sim} R_{i1} - S_1 U_{с1\sim} R_{i1}.$$

Подставив это выражение в уравнение (3). Тогда

$$I_{а\sim} = S_2(R_{i1} S_1 U_{с1} - I_{а\sim} R_{i1}) - \frac{1}{R_{i2}}(I_{а\sim} R_н + I_{а\sim} R_{i1} - R_{i1} S_1 U_{с1\sim}).$$

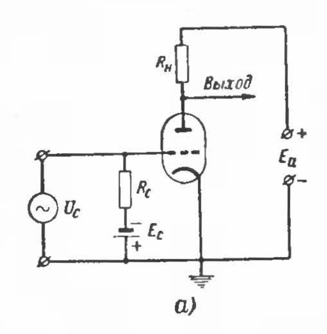
Отсюда следует, что переменная составляющая анодного тока каскодного усилителя, образованного лампами $Л_1$ и $Л_2$, равна:

$$I_{a\sim} = \frac{R_{i1}S_1(R_{i2}S_2 + 1)U_{c1\sim}}{R_н + R_{i1}(R_{i2}S_2 + 1) + R_{i2}}.$$

Преобразуем это выражение, используя известную связь между параметрами триодов $\mu = SR_i$:

$$I_{a\sim} = \frac{\mu_1(\mu_2 + 1)U_{c1\sim}}{R_н + R_{i1}(\mu_2 + 1) + R_{i2}}. \tag{4}$$

Полученное выражение по своей структуре аналогично выражению, связывающему переменную составляющую анодного тока и



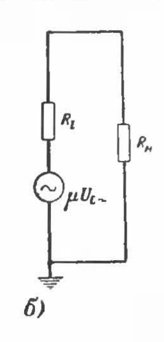


Рис. 2. Схема триодного усилителя с омической нагрузкой.

а — принципиальная схема; *б* — эквивалентная схема.

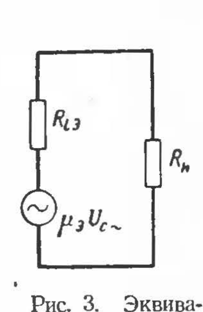


Рис. 3. Эквивалентная схема каскодного усилителя.

входное напряжение сигнала для обычного триодного усилителя, принципиальная и эквивалентная схемы которого приведены на рис. 2. Для такой схемы:

$$I_{a\sim} = \frac{\mu U_{c\sim}}{R_н + R_i}.$$

Сравнение рассматриваемых уравнений позволяет сделать вывод, что для каскодного усилителя верна эквивалентная схема обычного триодного усилителя, в которой вместо статических параметров триода использованы эквивалентные статические параметры каскодного усилителя. В приведенной на рис. 3 схеме эквивалентный коэффициент усиления равен:

$$\mu_э = \mu_1(\mu_2 + 1), \tag{5}$$

а выражение для эквивалентного внутреннего сопротивления усилителя имеет вид:

$$R_{iэ} = R_{i1}(\mu_2 + 1) + R_{i2}. \tag{6}$$

По формуле связи между статическими параметрами находится и эквивалентная крутизна характеристики каскодного усилителя:

$$S_э = \frac{\mu_э}{R_{iэ}} = \frac{\mu_1(\mu_2 + 1)}{R_{i1}(\mu_2 + 1) + R_{i2}}.$$

Поделив числитель и знаменатель на R_{i1}, выражение для эквивалентной крутизны можно преобразовать следующим образом:

$$S_э = S_1 \frac{\mu_2 + 1}{\mu_2 + 1 + \dfrac{R_{i2}}{R_{i1}}}. \tag{7}$$

Чаще всего в каскодных усилителях применяются либо двойные триоды, либо одинаковые по своим параметрам одиночные триоды. В этом случае формулы (5), (6) и (7) для эквивалентных параметров каскодного усилителя будут иметь соответственно следующий вид:

$$\mu_э = \mu(\mu + 1);$$

$$R_{iэ} = R_i(\mu + 2);$$

$$S_э = S\frac{\mu + 1}{\mu + 2}$$

или приближенно

$$\mu_э \approx \mu^2;$$

$$R_{iэ} \approx R_i\mu;$$

$$S_э \approx S.$$

Последние выражения наиболее наглядно показывают отличие эквивалетных статических параметров каскодного усилителя от статических параметров просто триода.

На основании полученных выражений для эквивалентных параметров каскодного усилителя можно произвести количественное сравнение каскодного усилителя на триодах с пентодным усилителем. Величина эквивалентного статического коэффициента усиления каскодного усилителя приблизительно равна произведению статических коэффициентов усиления применяемых триодов. В случае одинаковых триодов она равна квадрату статического коэффициента усиления триода. Обычно для усилительных триодов величина μ колеблется от 20 до 100. Следовательно, возможные значения $\mu_э$ могут лежать в пределах от 400 до 10 000. Примерно в этих же пределах лежит и величина статического коэффициента усиления пентода.

Эквивалентное внутреннее сопротивление каскодного усилителя больше внутреннего сопротивления первого триода приблизительно в μ_2 раз. Так как для большинства усилительных триодов внутреннее сопротивление лежит в пределах от 4 до 120 *ком*, то каскодный усилитель может обладать внутренним сопротивлением от 80 *ком* до

12 *Мом*. Пентоды имеют R_i от 10 *ком* до 2,5 *Мом*. Таким образом, и по этому параметру наблюдается соответствие каскодного усилителя пентодному, причем верхний предел для R_i в каскодном усилителе даже выше, чем у пентода. Последнее обстоятельство позволяет использовать каскодный усилитель для получения очень большого усиления в узкополосных системах.

Величина эквивалентной крутизны характеристики каскодного усилителя примерно равна величине крутизны характеристики первого триода. Как следует из уравнения (7), даже при применении в каскодном усилителе двух различных триодов, внутренние сопротивления которых отличаются в несколько раз, эквивалентная крутизна будет незначительно отличаться от S_1 при достаточно больших величинах μ_2. Величина крутизны характеристики современных усилительных триодов различна и у некоторых типов достигает 45 *ма/в*. Пентоды имеют крутизну до 30 *ма/в*. Следует отметить, что в каскодном усилителе нередко применяются пентоды в триодном включении, крутизна характеристики при этом на 20—30% выше, чем при пентодном включении. Увеличение крутизны характеристики пентода в триодном включении объясняется тем, что в этом случае ток экранирующей сетки лампы используется в цепи анодной нагрузки. Таким образом, при применении в каскодном усилителе двух пентодов в триодном включении эквивалентная крутизна характеристики усилителя может превышать крутизну пентода на 20—30%.

Из проведенного анализа видно, что статические параметры каскодного усилителя либо соответствуют статическим параметрам пентода, либо превосходят их. При этом каскодный усилитель имеет такое важное преимущество перед пентодом, как значительно меньшая величина шумов. Ниже будет показано, что собственные шумы каскодного усилителя примерно равны шумам одного триода, которые в 3—5 раз меньше шумов пентода, обладающего той же крутизной характеристики.

3. КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ КАСКОДНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Коэффициент усиления схемы, в которую входит каскодный усилитель, определяется как отношение переменной составляющей напряжения на анодной нагрузке $R_н$ триода $Л_2$ к переменной составляющей входного сигнала $U_{c1\sim}$, приложенного к сетке лампы $Л_1$:

$$k = \frac{U_{a2\sim}}{U_{c1\sim}}.$$

Подставляя вместо $U_{a2\sim}$ его выражение через переменную составляющую анодного тока каскодного усилителя [уравнение (4)], получаем выражение для коэффициента усиления схемы в значениях параметров составляющих триодов и в значениях эквивалентных параметров:

$$U_{a2\sim} = I_{a\sim} R_н;$$

$$k = \frac{\mu_1 (\mu_2 + 1) R_н}{R_н + R_{i1} (\mu_2 + 1) + R_{i2}}; \quad (8)$$

$$k = \frac{\mu_э R_н}{R_н + R_{iэ}}. \quad (9)$$

Разделив числитель и знаменатель правой части уравнения (9) на $R_н$, получим следующее выражение для коэффициента усиления схемы:

$$k = \frac{\mu_э}{1 + R_{iэ}/R_н}. \quad (10)$$

Из этого выражения видно, что при выполнении условия $R_н > R_{iэ}$ коэффициент усиления схемы с каскодным усилителем становится близок к величине эквивалентного статического коэффициента усиления каскодного усилителя. В реальных случаях реализовать это максимальное значение усиления бывает весьма трудно. В узкополосных резонансных усилителях величина $R_н$ в виде активного сопротивления резонансного контура ограничивается доступной величиной добротности контура.

В усилителях низкой частоты увеличение омического сопротивления нагрузки сопровождается обычно и увеличением требуемого напряжения анодного питания E_a. Это необходимо для сохранения выбранного положения рабочей точки, а следовательно и всех статических параметров усилителя. Однако это положение справедливо в равной мере и для пентодных усилителей.

Из сказанного следует, что в узкополосных системах каскодные усилители позволяют реализовать очень большое усиление.

В широкополосных каскодных усилителях обычно выполняется условие $R_н \ll R_{iэ}$. Для этого случая удобнее применять формулу для коэффициента усиления схемы, получаемую делением числителя и знаменателя правой части выражения (9) на $R_{iэ}$.

$$k = \frac{S_э R_н}{1 + R_н/R_{iэ}}. \quad (11)$$

Из-за малой величины $R_н$ по сравнению с $R_{iэ}$ членом $R_н/R_{iэ}$ выражения (11) можно пренебречь. Тогда коэффициент усиления будет равен:

$$k \approx S_э R_н. \quad (12)$$

Это выражение хорошо известно из теории пентодных усилителей, для которых обычно выполняется условие $R_н \ll R_i$. Из выражения (7) следует, что крутизна характеристики каскодного усилителя в основном определяется первым триодом. Это означает, что для достижения наибольшего коэффициента усиления в широкополосном каскодном усилителе следует выбирать в качестве лампы $Л_1$ триод с возможно большей величиной крутизны характеристики. Попутно заметим, что чем больше крутизна характеристики триода, тем меньше его собственные шумы, что нередко играет решающее значение в широкополосных усилителях.

4. УСТОЙЧИВОСТЬ КАСКОДНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Одним из наиболее существенных качеств любого усилителя, особенно предназначенного для усиления высоких частот, является его устойчивость. Рассмотрим для примера резонансный каскодный усилитель, в котором на входе и на выходе имеются резонансные контуры.

При анализе вопроса устойчивости имеется в виду возможность связи выхода со входом через проходные емкости ламп. Существует много и других паразитных связей, но все они могут быть устранены при рациональном монтаже и конструкции.

Рассмотрим устойчивость усилителя с заземленной сеткой и устойчивость усилителя с заземленным катодом по отдельности, но с учетом влияния их друг на друга в каскодной схеме.

Необходимо остановиться на некоторых особенностях усилителя с заземленной сеткой. Эквивалентная схема усилителя приведена на рис. 4,*а*. Источник сигнала с эквивалентной э. д. с., равной $E_г$, и

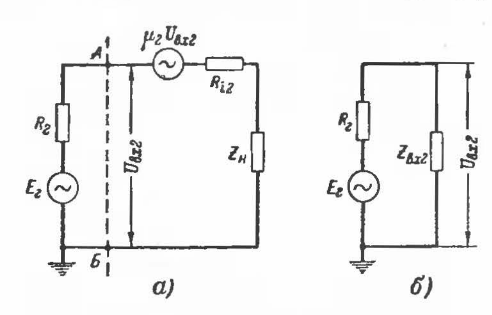


Рис. 4. Эквивалентная схема усилителя с заземленной сеткой.

а — полная эквивалентная схема; *б* — эквивалентная схема без входной цепи.

эквивалентным внутренним сопротивлением $R_г$ подключен к катоду лампы усилителя (точка *А*). Триод заменен эквивалентной э. д. с., равной $\mu_2 U_{вх.2}$, и внутренним сопротивлением R_{i2}, причем эквивалентная э. д. с. триода и напряжение $U_{вх.2}$ действует синфазно. На рис. 4,*б* приведена эквивалентная схема входной цепи триода, в которой $Z_{вх.2}$ — полное входное сопротивление правой части эквивалентной схемы, изображенной на рис. 4,*а* (правее точек *АБ*). Очевидно, что прикладываемое к катоду триода напряжение $U_{вх.2}$ зависит от соотношения сопротивлений $R_г$ и $Z_{вх.2}$. Из эквивалентной схемы следует, что

$$\overline{U}_{вх.2} = \overline{I}_{а\sim} Z_{вх.2}. \quad (13)$$

С другой стороны, из рис. 4,*а* видно, что

$$\overline{I}_{а\sim} = \frac{\overline{U}_{вх.2} + \mu_2 \overline{U}_{вх.2}}{R_{i2} + Z_н}. \quad (14)$$

Подставляя это выражение в формулу (13), получим:

$$\overline{U}_{вх.2} = \frac{\overline{U}_{вх.2} + \mu_2 \overline{U}_{вх.2}}{R_{i2} + Z_н} Z_{вх.2}.$$

Отсюда

$$Z_{вх.2} = \frac{Z_н + R_{i2}}{1 + \mu_2}. \quad (15)$$

Из последнего выражения видно, что входное сопротивление усилителя с заземленной сеткой зависит от сопротивления нагрузки, т. е. в таком усилителе имеется внутренняя отрицательная обратная связь.

В формуле (15) сопротивление выходного контура $Z_н$ следующим образом зависит от расстройки контура:

$$Z_н = \frac{\rho_2}{d_{э2} + jy},$$

где $\rho_2 = \frac{1}{\omega C_2}$ — волновое сопротивление контура;

C_2 — полная емкость контура;

y — относительная расстройка контура.

$$y = \frac{f - f_0}{f_0},$$

где f — частота сигнала;

f_0 — резонансная частота контура.

В формуле для $Z_н$ числитель и знаменатель можно умножить на комплексно-сопряженную величину знаменателя $d_{э2} - jy$, тогда получим отдельно активную составляющую $R_н$ и реактивную составляющую $jX_н$ сопротивления:

$$Z_н = \frac{\rho_2 (d_{э2} - jy)}{d_{э2}^2 + y^2}.$$

$$R_н = \frac{\rho_2 d_{э2}}{d_{э2}^2 + y^2} \quad и \quad jX_н = -j \frac{\rho_2 y}{d_{э2}^2 + y^2}.$$

Зависимость этих сопротивлений от расстройки контура показана на рис. 5,*а*.

При резонансе ($y = 0$) сопротивление контура $Z_н$ равно величине $R_{э.н} = \frac{\rho_2}{d_{э2}}$.

Входное сопротивление усилителя с заземленной сеткой $Z_{вх.2}$ также состоит из активной и реактивной составляющих, которые можно найти, представив формулу (15) следующим образом:

$$Z_{вх.2} = \frac{1}{S_2} + \frac{R_н}{1 + \mu_2} + j \frac{X_н}{1 + \mu_2}.$$

Эти составляющие входного сопротивления показаны на рис. 5,*б*. Тогда

$$R_{вх.2} = \frac{1}{S_2} + \frac{R_н}{1 + \mu^2}$$

и

$$jX_{вх\,2} = j \frac{X_н}{1 + \mu_2}.$$

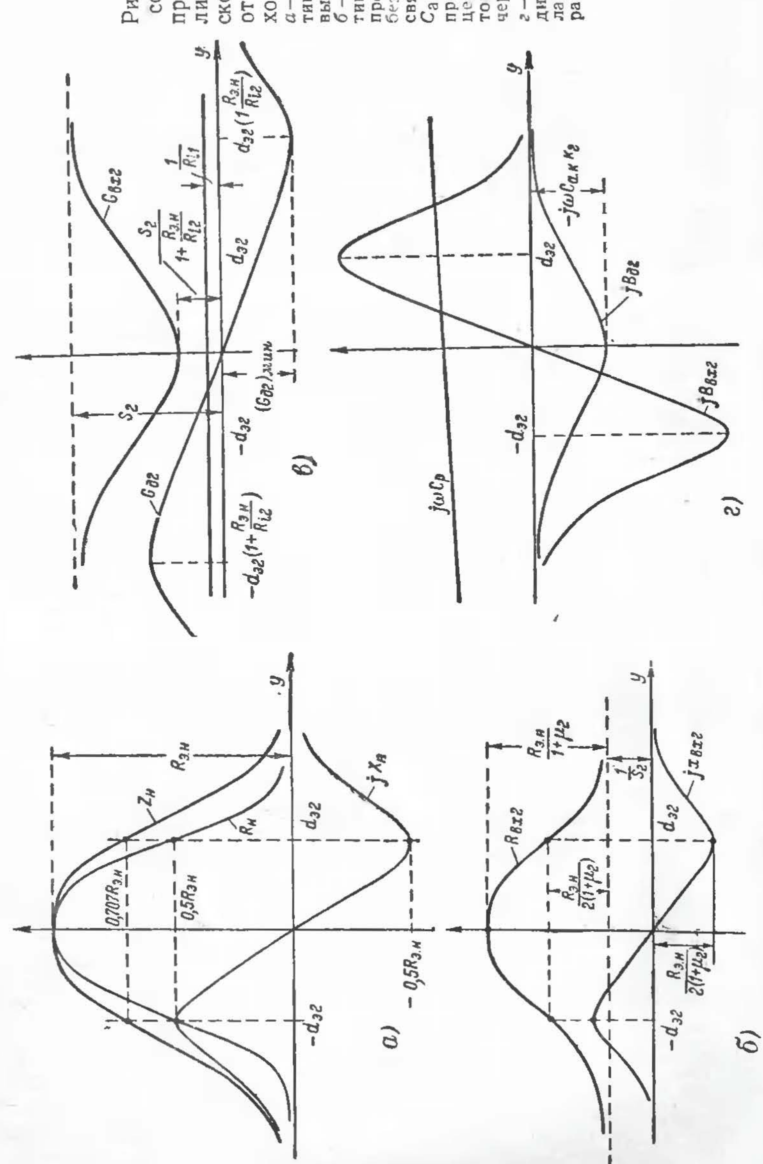


Рис. 5. Зависимость сопротивлений и проводимостей различных цепей каскодного усилителя от расстройки выходного контура.

а — активного и реактивного сопротивления выходного контура; *б* — активного и реактивного входного сопротивления лампы $Л_2$ без учета обратной связи через емкость $C_{а.к}$; *в* — активной проводимости входной цепи лампы $Л_2$ с учетом обратной связи через емкость $C_{а.к}$; *г* — реактивной проводимости входной цепи лампы $Л_2$ с учетом обратной связи через емкость $C_{а.с}$.

Иначе активную составляющую можно записать, как:

$$R_{вх.2} = \frac{1 + \frac{R_н}{R_{i2}}}{S_2}.$$

При $R_{э.н} \ll R_{i2}$ получим $R_{вх.2} \approx \frac{1}{S_2}$, но обычно $R_{э.н}$ соизмеримо по порядку величины с R_{i2}, поэтому полное представление о входном сопротивлении усилителя с заземленной сеткой дает рис. 5,*б*.

Вследствие низкого входного сопротивления усилителя его коэффициент усиления по мощности мал. Там, где желательно иметь малые собственные шумы, применение усилителя с заземленной сеткой самого по себе ограничено тем, что при малом коэффициенте усиления по мощности сильно сказываются шумы последующих каскадов (см. § 8). Малое входное сопротивление также ограничивает область применения усилителей с заземленной сеткой в тех случаях, когда на входе надо иметь настроенный относительно узкополосный контур. Все же на частотах УКВ диапазона усилители с заземленной сеткой находят довольно широкое применение ввиду их высокой устойчивости.

Как это было показано ранее, выходным сопротивлением каскодного усилителя является сопротивление, равное:

$$R_{iэ} = R_{i2} + R_{i1}(1 + \mu_2).$$

Для усилителя с заземленной сеткой, эквивалентная схема которого приведена на рис. 4, можно вывести аналогичное выражение выходного сопротивления:

$$R_{вых} = R_{i2} + R_г(1 + \mu_2).$$

В случае использования усилителя с заземленной сеткой в каскодной схеме $R_г = R_{i1}$.

Таким образом, в усилителе с заземленной сеткой входное сопротивление зависит от сопротивления нагрузки, а выходное сопротивление зависит от внутреннего сопротивления источника сигнала $R_г$.

Коэффициент усиления по напряжению усилителя с заземленной сеткой равен:

$$\overline{k_2} = \frac{\overline{U}_{вых.2}}{\overline{U}_{вх.2}},$$

где $\overline{U}_{вых.2}$ — напряжение на выходе усилителя с заземленной сеткой.

Так как $\overline{U}_{вых.2} = \overline{I}_{a\sim} Z_н$, то с учетом зависимости (14) получим следующее выражение для коэффициента усиления:

$$\overline{k_2} = \frac{(1+\mu_2) Z_н}{R_{i2} + Z_н}, \quad \text{или} \quad \overline{k_2} \approx \frac{S_2 Z_н}{1 + \frac{Z_н}{R_{i2}}}.$$

Это выражение почти не отличается от выражения для коэффициента усиления усилителя с заземленным катодом, так как обычно

$$1+\mu_2 \approx \mu_2.$$

Рассмотрим вопрос устойчивости. В усилителе с заземленной сеткой проходной емкостью является емкость $C_{а.к}$. Величина этой емкости у приемно-усилительных триодов достаточно велика. Обычно она лишь в несколько раз меньше емкости $C_{а.с}$. Только у специальных маячковых триодов, применяемых в дециметровом диапазоне частот, величина этой емкости значительно уменьшена. Тем не менее усилители с заземленной сеткой, построенные даже на обычных лампах, очень устойчивы. Причиной этого является также и то, что полное сопротивление цепи катода относительно земли по переменному току очень мало, и поэтому наводимое через емкость $C_{а.к}$ напряжение на этом сопротивлении также мало.

Влияние емкости $C_{а.к}$ эквивалентно наличию некоторой комплексной проводимости между катодом и сеткой лампы — динамической входной проводимости.

Через емкость $C_{а.к}$ течет ток:

$$\overline{I}_{с2} = \overline{U}_{а.к}\, j\omega C_{а.к}\,,$$

где $\overline{U}_{а.к}$ — напряжение между анодом и катодом.

Напряжение $\overline{U}_{а.к}$ равно:

$$\overline{U}_{а.к} = \overline{U}_{вх.2} - \overline{U}_{вых.2}\,.$$

Выходное напряжение $\overline{U}_{вых.2}$ связано с входным $\overline{U}_{вх.2}$ через коэффициент усиления $\overline{k}_2$. Поэтому можно записать:

$$\overline{U}_{вых.2} = \overline{U}_{вх.2}\,\frac{(1+\mu_2)Z_н}{R_{i2}+Z_н} = \overline{U}_{вх.2}\,\frac{S_2 Z_н}{1+\dfrac{Z_н}{R_{i2}}}\,.$$

С учетом всего этого ток через емкость $C_{а.к}$ будет:

$$\overline{I}_{с2} = j\omega C_{а.к}\,\overline{U}_{вх.2}\left(1-\frac{S_2 Z_н}{1+\dfrac{Z_н}{R_{i2}}}\right).$$

Току $\overline{I}_{с2}$ соответствует определенная величина проводимости:

$$\frac{\overline{I}_{с2}}{\overline{U}_{вх.2}} = j\omega C_{а.к} - j\omega C_{а.к}\, S_2\,\frac{Z_н}{1+\dfrac{Z_н}{R_{i2}}}\,. \qquad (16)$$

Первое слагаемое в правой части представляет собой проводимость постоянной емкости $C_{а.к}$, которая добавляется к входной емкости. Второе слагаемое представляет собой комплексную динамическую входную проводимость, в составе которой есть активная и реактивная составляющие:

$$Y_{д2} = G_{д2} + jB_{д2}\,,$$

где $Y_{д2}$ — комплексная динамическая входная проводимость усилителя с заземленной сеткой;

$G_{д2}$ — активная составляющая;

$jB_{д2}$ — реактивная составляющая.

Раскрывая значение $Z_н$, можно записать:

$$Y_{д2} = -j\omega C_{а.к}\, S_2\,\frac{\rho_2}{\left[1+\dfrac{\rho_2}{R_{i2}(d_{э2}+jy)}\right](d_{э2}+jy)}\,,$$

или

$$Y_{д2} = -j\omega C_{а.к}\, S_2\rho_2\,\frac{1}{d_{э2}\left(1+\dfrac{R_{э.н}}{R_{i2}}\right)+jy}$$

Умножим числитель и знаменатель этого выражения на сопряженную величину $d_{э2}\left(1+\dfrac{R_{э.н}}{R_{i2}}\right)-jy$.

Тогда

$$Y_{д2} = -j\omega C_{а.к}\, S_2\rho_2\,\frac{d_{э2}\left(1+\dfrac{R_{э.н}}{R_{i2}}\right)-jy}{d_{э2}^2\left(1+\dfrac{R_{э.н}}{R_{i2}}\right)^2+y^2}\,.$$

Теперь можно записать по отдельности активную и реактивную составляющие входной динамической проводимости:

$$\left.\begin{aligned} G_{д2} &= -\omega C_{а.к}\, S_2\rho_2\,\frac{y}{d_{э2}^2\left(1+\dfrac{R_{э.н}}{R_{i2}}\right)^2+y^2}\,; \\ jB_{д2} &= -j\omega C_{а.к}\, S_2\rho_2\,\frac{d_{э2}\left(1+\dfrac{R_{э.н}}{R_{i2}}\right)}{d_{э2}^2\left(1+\dfrac{R_{э.н}}{R_{i2}}\right)^2+y^2}\,. \end{aligned}\right\} \qquad (17)$$

Величина активной входной динамической проводимости может принимать как положительные, так и отрицательные значения в зависимости от направления расстройки (знака y). При $y<0$ (усиливаемая частота ниже резонансной частоты контура, т. е. сопротивление контура носит индуктивный характер) $G_{д2}>0$, и во входную цепь лампы $Л_2$ будет вноситься дополнительное затухание, т. е. имеет место случай отрицательной обратной связи. При $y>0$, $G_{д2}<0$, и потери во входной цепи лампы $Л_2$ компенсируются за счет обратной связи через емкость $C_{а.к}$, — связь при этом имеет характер положительной обратной связи. Если общая проводимость входной цепи лампы $Л_2$ при какой-либо величине расстройки y станет отрицательной, то возникнет самовозбуждение.

Проанализируем характер суммарной активной проводимости входной цепи лампы $Л_2$.

На рис. 5, *в* приведены все составляющие этой проводимости. Проводимость $G_{вх.2}$ определяется значениями $R_{вх.2}$ и $jX_{вх.2}$ (рис. 5, *б*) и может быть найдена по формуле

$$G_{вх.2}=\frac{R_{вх.2}}{R^2_{вх.2}+X^2_{вх.2}}.$$

На рис. 5, *в* показана также выходная проводимость лампы $Л_1$; обычно ею можно пренебречь, так как $\frac{1}{R_{i1}}\ll G_{вх.2}$. Там же показана зависимость активной динамической проводимости от расстройки. Минимальное значение $G_{д2}$ принимает при расстройке выходного контура $y=d_{э2}\left(1+\frac{R_{э.н}}{R_{i2}}\right)$.

Подставив это значение y в формулу (17), найдем, что минимальная активная динамическая проводимость равна:

$$(G_{д2})_{мин}=-\omega C_{а.к}\,S_2\rho_2\frac{1}{2d_{э2}\left(1+\frac{R_{э.н}}{R_{i2}}\right)}.$$

Следует отметить, что при $\frac{R_{э.н}}{R_{i2}}\ll 1$ величина $G_{вх.2}\approx S_2$, а минимум динамической проводимости $(G_{д2})_{мин}$ имеет место при $y=d_{э2}$.

При увеличении соотношения $\frac{R_{э.н}}{R_{i2}}$ величина $G_{вх.2}$ уменьшается, а положение минимума $(G_{д2})_{мин}$ смещается вправо вдоль оси y. Проводимость $G_{вх.2}$ всегда положительна, а $(G_{д2})_{мин}$ отрицательна.

Поэтому хотя минимум суммарной проводимости может иметь место на резонансной частоте, соответствующей частному минимуму проводимости $G_{вх.2}$, значение суммарной проводимости в этой точке всегда больше нуля.

Наибольшая опасность самовозбуждения имеет место при расстройке $y=d_{э2}\left(1+\frac{R_{э.н}}{R_{i2}}\right)$, близкой к частному минимуму функции $G_{д2}$. Такому значению расстройки всегда соответствует пологий участок кривой $G_{вх.2}$. Обычно $R_{э.н}$ или меньше R_{i2}, или сравнимо с ним по порядку величины. В этом случае при расстройке $y=d_{э2}\left(1+\frac{R_{э.н}}{R_{i2}}\right)$ можно принять:

$$G_{вх.2}=S_2.$$

Таким образом, с оговоренными выше допущениями условие отсутствия самовозбуждения можно записать, как

$$S_2+(G_{д2})_{мин}\geqslant 0$$

или подставляя вместо $(G_{д2})_{мин}$ его значение, получим:

$$S_2=\omega C_{а.к}\,s_2\rho_2\frac{1}{2d_{э2}\left(1+\frac{R_{э.н}}{R_{i2}}\right)}.$$

Так как $\rho_2=R_{э.н}\,d_{э2}$, то неравенство можно преобразовать следующим образом:

$$\omega C_{а.к}\frac{S_2R_{э.н}}{1+\frac{R_{э.н}}{R_{i2}}}\leqslant 2S_2.$$

Дробь в левой части неравенства есть не что иное, как коэффициент усиления k_2 при резонансе (см. выше). Поэтому условие отсутствия самовозбуждения принимает вид:

$$k_2\leqslant\frac{2S_2}{\omega C_{а.к}}.$$

Сравнивая это выражение с широко известным условием отсутствия самовозбуждения для усилителя с заземленным катодом, имеющего на входе и на выходе одинаковые резонансные контуры

$$k_0\leqslant\sqrt{\frac{2S}{\omega C_{а.с}}},$$

можно прийти к выводу, что при одинаковых значениях емкостей $C_{а.с}=C_{а.к}$ и одинаковых величинах крутизны $S_2=S$ усилитель с заземленной сеткой может давать более устойчивое усиление, чем усилитель с заземленным катодом.

В более широком смысле под устойчивостью усилителя с заземленной сеткой следует понимать не только отсутствие самовозбуждения, но и отсутствие влияния связи через емкость $C_{а.к}$ на величину и характер входной проводимости лампы $Л_2$. Поэтому вводится понятие коэффициента устойчивости $k_у$, который характеризует, насколько далек усилитель от самовозбуждения.

Окончательная формула для проверки усилителя с заземленной сеткой, входящего в состав каскодного усилителя, будет:

$$k_2 \leqslant \frac{2S_2(1-k_у)}{\omega C_{а.к}}. \qquad (18)$$

Обычно принимают $k_у = 0{,}8 - 0{,}9$.

Это означает, что входная проводимость может измениться за счет связи через емкость $C_{а.к}$ не более чем на 10 — 20%.

Пример. Подсчитаем допустимый коэффициент усиления усилителя с заземленной сеткой, входящего в состав каскодного усилителя, выполненного на лампе 6Н14П.

Для этой лампы (см. табл. 1) $C_{а.к} = 0{,}3$ *пф* и S_1 и $S_2 = 6{,}8$ *ма/в*.

Резонансную частоту контура примем равной 30 *Мгц*. Зададимся коэффициентом устойчивости $k_у = 0{,}85$.

Тогда

$$k_2 \leqslant \frac{2\cdot 6{,}8\cdot 10^{-3}(1-0{,}85)}{2\cdot 3{,}14\cdot 30\cdot 10^6\cdot 0{,}3\cdot 10^{-12}} = 37.$$

Это довольно высокое значение допустимого коэффициента усиления на такой частоте.

Рассмотрим теперь устойчивость усилителя с заземленным катодом, входящего в состав каскодного усилителя. На входе этого усилителя имеется резонансный контур, аналогичный резонансному контуру на выходе усилителя с заземленной сеткой Зависимости активного и реактивного сопротивлений входного контура от расстройки будут иметь вид, который был представлен на рис. 5, *а*, с той лишь разницей, что при других величинах затухания входного контура $d_{э1}$ и волнового сопротивления ρ_1 изменится масштаб этих кривых. При резонансе сопротивление этого контура будет равно:

$$R_{э1} = \frac{\rho_1}{d_{э1}},$$

а активная проводимость

$$G_{вх.1} = \frac{1}{R_{э1}}.$$

Нагрузкой усилителя с заземленным катодом служит полное входное сопротивление Z_0 усилителя с заземленной сеткой, которое в общем случае имеет активную R_0 и реактивную jX_0 составляющие. Эти составляющие связаны с полными проводимостями следующими соотношениями: $R_0 = \frac{G_0}{G_0^2+B_0^2}$; $jX_0 = -\frac{jB_0}{G_0^2+B_0^2}$,

где G_0 — суммарная активная проводимость входной цепи лампы $Л_2$, она может быть найдена как графически из рис. 5,*в*, так и аналитически $G_0 = G_{вх.2} + G_{д2}$, если вместо $G_{вх.2}$ и $G_{д2}$ подставить их выражения, приведенные выше;

jB_0 — суммарная реактивная проводимость входной цепи лампы $Л_2$, эта проводимость будет состоять из проводимости общей распределенной емкости $C_р$, куда входят емкость сетка — катод $C_{с.к}$ лампы $Л_2$, емкость анод — катод $C_{а.к}$ лампы $Л_2$, емкость катод — накал $C_{к.н}$ лампы $Л_2$, выходная емкость $C_{вых}$ лампы $Л_1$ и емкость монтажа $C_м$.

Проводимость через емкость $C_р$ равна $j\omega C_р$. Выражение для реактивной динамической входной проводимости усилителя с заземленной сеткой $jB_{д2}$ было приведено выше [см. (17)]. Эта проводимость имеет индуктивный характер. Реактивная входная проводимость, которая имеет место благодаря отрицательной обратной связи через лампу в усилителе с заземленной сеткой, может быть найдена через известные уже зависимости входных (активного $R_{вх.2}$ и реактивного $jX_{вх.2}$) сопротивлений, представленные на рис. 5, *б*, по формуле

$$jB_{вх.2} = -j\frac{X_{вх.2}}{R_{вх.2}^2 + X_{вх.2}^2}.$$

Таким образом, суммарную реактивную проводимость можно представить как сумму

$$jB_0 = j\omega C_р + jB_{д2} + jB_{вх.2}.$$

Все составляющие этой проводимости показаны на рис. 5, *г*.

Входное полное сопротивление Z_0 усилителя с заземленной сеткой может иметь различный характер в зависимости от соотношения между полной активной проводимостью G_0 и полной реактивной проводимостью jB_0. Но по своей абсолютной величине сопротивление Z_0, как правило, значительно меньше внутреннего сопротивления R_{i1} первого триода. Поэтому с достаточной степенью точности коэффициент усиления усилителя с заземленным катодом может быть выражен, как

$$\overline{k}_1 \approx S_1 Z_0.$$

Ток через проходную емкость $C_{а.с}$ первой лампы

$$\overline{I}_{c1} = \overline{U}_{а.с} j\omega C_{а.с},$$

где $\overline{U}_{а.с}$ — напряжение между анодом и сеткой, $\overline{U}_{а.с} = \overline{U}_{вх.1} - \overline{U}_{вых.1}$.

С учетом того, что знак напряжения на выходе в усилителе с заземленным катодом изменяется на обратный, можно записать:

$$\overline{U}_{вых.1} = -\overline{U}_{вх.1}\overline{k}_1 = -\overline{U}_{вх.1} S_1 Z_0,$$

тогда

$$\overline{I}_{c1} = j\omega C_{a.c}\overline{U}_{вх.1}(1 + S_1 Z_0).$$

Току $\overline{I}_{c1}$ соответствует величина проводимости

$$\frac{\overline{I}_{c1}}{\overline{U}_{вх.1}} = j\omega C_{a.c} + j\omega C_{a.c} S_1 Z_0.$$

Первое слагаемое в правой части является проводимостью постоянной емкости $C_{a.c}$, которая добавляется к емкости входного контура. Второе слагаемое представляет собой комплексную динамическую входную проводимость $Y_{д1}$, в составе которой есть активная $G_{д1}$ и реактивная $jB_{д1}$ составляющие, т. е.

$$Y_{д1} = G_{д1} + jB_{д1}.$$

Представив сопротивление Z_0 в виде $Z_0 = R_0 + jX_0$, можно записать по отдельности выражения для активной и реактивной составляющих входной динамической проводимости:

$$G_{д1} = -\omega C_{a.c} S_1 X_0; \quad jB_{д1} = j\omega C_{a.c} S_1 R_0.$$

Реактивная проводимость $jB_{д1}$ всегда имеет емкостный характер, т. е. к емкости входного контура за счет связи через $C_{a.c}$ добавляется еще некоторая динамическая входная емкость $C_{a.c} S_1 R_0$.

Так как

$$jX_0 = -j\frac{B_0}{G_0^2 + B_0^2},$$

то активную динамическую входную проводимость можно выразить через проводимости входной цепи лампы $Л_2$:

$$G_{д1} = \omega C_{a.c} S_1 \frac{B_0}{G_0^2 + B_0^2}.$$

Условие отсутствия самовозбуждения можно записать, как:

$$G_{вх.1} + G_{д} \geqslant 0,$$

т. е. общая активная проводимость входного контура должна быть положительной.

Наиболее опасным является случай, когда входной контур настроен как раз на ту частоту, на которой входная активная динамическая проводимость имеет минимальную величину. Тогда условие отсутствия самовозбуждения можно записать, как:

$$\frac{1}{R_{э1}} + (G_{д1})_{мин} \geqslant 0.$$

Остается выяснить, при каких расстройках и какой величины имеет место минимум $(G_{д1})_{мин}$.

Для того чтобы $G_{д1}$ было отрицательной величиной, jB_0 также должно быть отрицательным, т. е. $G_{д1} < 0$ при индуктивном характере проводимости входной цепи лампы $Л_2$. Из графиков (рис. 5, *г*) видно, что минимум $G_{д1}$ может иметь место при значениях $y \leqslant 0$. Основное значение здесь имеет величина связи через емкость $C_{a.к}$ второй лампы и величина сопротивления нагрузки второй лампы $R_{э.н}$.

Оценим порядок величин отдельных составляющих реактивной проводимости jB_0. Реальное значение емкости $C_{a.к}$ составляет в среднем около 0,5 *пф*. Тогда даже при максимальном допустимом устойчивом усилении, который в приведенном выше примере был равен $k_2 = 37$, минимальное значение входной реактивной динамической проводимости за счет емкости будет: $-j\omega \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-12} \cdot 37$.

Проводимость за счет емкости $C_р$ будет не меньшей величины, так как $C_р$ обычно не меньше 20 *пф*. Поэтому практически можно считать, что никогда за счет входной динамической проводимости лампы $Л_2$ не будет минимума проводимости $G_{д1}$, который был бы меньше нуля. Основное же влияние на проводимость $G_{д1}$ оказывает величина реактивной входной динамической проводимости за счет отрицательной обратной связи через лампу $Л_2$. Тогда с некоторым приближением полное сопротивление входной цепи лампы $Л_2$ (рис. 5, *г*) выражается формулой:

$$Z_0 \approx \frac{1}{S_2} + \frac{\rho_2}{(1 + \mu_2)(d_{э2} + jy)}.$$

Подставим это значение в формулу для комплексной входной динамической проводимости лампы $Л_1$:

$$Y_{д1} = j\omega C_{a.c} S_1 \left[\frac{1}{S_2} + \frac{\rho_2}{(1 + \mu_2)(d_{э2} + jy)}\right].$$

Умножив числитель и знаменатель второй дроби на сопряженную величину $d_{э2} - jy$, можно получить по отдельности выражения для активной и реактивной составляющих входной динамической проводимости:

$$\left.\begin{aligned} G_{д1} &= \omega C_{a.c} S_1 \frac{\rho_2 y}{(1 + \mu_2)(d_{э2}^2 + y^2)}; \\ jB_{д1} &= j\omega C_{a.c} \frac{S_1}{S_2} + j\frac{\rho_2 d_{э2}}{(1 + \mu_2)(d_{э2}^2 + y^2)}. \end{aligned}\right\} \quad (19)$$

Нас интересует минимальное значение активной динамической проводимости $(G_{д1})_{мин}$.

Этот минимум имеет место при расстройке $y = -d_{э2}$. Величина $(G_{д1})_{мин}$ будет:

$$(G_{д1})_{мин} = -\omega C_{a.c} S_1 \frac{\rho_2}{2(1 + \mu_2) d_{э2}}.$$

Условие отсутствия самовозбуждения можно переписать так:

$$\frac{1}{R_{э1}} - \omega C_{а.с} S_1 \frac{\rho_2}{2(1+\mu_2) d_{э2}} \geqslant 0,$$

или, подставляя $\frac{\rho_2}{d_{э2}} = R_{э.н}$, получим:

$$\omega C_{а.с} R_{э1} S_1 R_{э.н} \leqslant 2(1+\mu_2).$$

В этой формуле произведение $S_1 R_{э.н}$ можно рассматривать как коэффициент усиления k каскодного усилителя в целом, потому что обычно имеет место неравенство $R_{э.н} \ll R_{iэ}$, где $R_{iэ}$ — эквивалентное внутреннее сопротивление (выходное сопротивление) каскодного усилителя.

Тогда условие отсутствия самовозбуждения:

$$k \leqslant \frac{2(1+\mu_2)}{\omega C_{а.с} R_{э1}}.$$

В том случае, если на входе и на выходе каскодного усилителя имеются одинаковые контуры, $R_{э1} = R_{э.н} = R_э$. Поэтому, умножив числитель и знаменатель правой части неравенства на S_1, получим:

$$k \leqslant \frac{2(1+\mu_2) S_1}{\omega C_{а.с} k},$$

или окончательно условие отсутствия самовозбуждения будет:

$$k \leqslant \sqrt{\frac{2S_1(1+\mu_2)}{\omega C_{а.с}}}.$$

Но чтобы в отсутствии самовозбуждения исключить влияние выходных цепей на входной контур, следует ввести в формулу коэффициент устойчивости $k_у$.

Тогда формула для проверки каскодного усилителя на устойчивость примет вид:

$$k \leqslant \sqrt{\frac{2S_1(1+\mu_2)(1-k_у)}{\omega C_{а.с}}}. \qquad (20)$$

Обычно $k_у = 0{,}8$—$0{,}9$, при этом свойства входного контура, в частности добротность, изменяются вследствие обратной связи через емкость $C_{а.с}$ всего лишь на 10—20%.

Последняя формула является проверкой на устойчивость усилителя с заземленным катодом с учетом влияния усилителя с заземленной сеткой в случае их непосредственного соединения, как это имеет место в каскодном усилителе. Поэтому в эту формулу входят как параметры первой лампы, так и параметры второй лампы.

Пример: Для каскодного усилителя на лампе 6Н14П $C_{а.с} = 1{,}8$ *пф*; $\mu_1 = \mu_2 = 25$; $S_1 = S_2 = 6{,}8$ *ма/в*.

Частоту усиливаемого сигнала возьмем 30 *Мгц*. Коэффициент устойчивости примем $k_у = 0{,}85$. Тогда по формуле (20)

$$k \leqslant \sqrt{\frac{2\cdot 6{,}8\cdot 10^{-3}(1+25)(1-0{,}85)}{2\cdot 3{,}14\cdot 30\cdot 10^6\cdot 1{,}8\cdot 10^{-12}}} = 12{,}5.$$

Для широкополосного усилителя это вполне достаточная величина, но для узкополосного усилителя этого значения уже недостаточно. Поэтому в каскодном усилителе обычно нейтрализуют действие емкости $C_{э.с}$ одним из способов, показанным ниже на конкретных примерах. Кроме того, иногда в анодную цепь лампы $Л_1$ включается добавочный резонансный контур, настройкой которого также можно несколько повысить устойчивость каскодного усилителя.

Следует отметить, что для устойчивости работы каскодного усилителя требуется одновременное выполнение двух условий устойчивости (18) и (20). В случае, если одно из этих условий не выполняется, необходимо применить нейтрализацию соответствующей проходной емкости.

5. ВЫБОР ЛАМП ДЛЯ КАСКОДНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Наиболее общим требованием при выборе электронных ламп для каскодного усилителя является их коэффициент широкополосности или добротность. Этот параметр отражает возможность применения лампы для усиления в широкой полосе частот и равен максимальному значению произведения коэффициента усиления на полосу пропускания $(k\Delta f)_{макс}$. Из теории широкополосных усилителей известно, что для обеспечения требуемой полосы пропускания Δf сопротивление нагрузки не должно превышать предельного значения:

$$R_{н.макс} = \frac{1}{2\pi\Delta f (C_{вх} + C_{вых})}, \qquad (21)$$

где $C_{вх}$ и $C_{вых}$ — соответственно входная и выходная емкости ламп.

Значение сопротивления нагрузки уменьшается при учете других емкостей, подключенных параллельно нагрузке (в том числе емкостей монтажа и т. п.).

Коэффициент широкополосности для каскодного усилителя можно записать, воспользовавшись уравнением (12):

$$(k\Delta f)_{макс} = \frac{S_э}{2\pi(C_{вх} + C_{вых})}.$$

Если обе лампы каскодного усилителя одинаковы, то выражение приобретает вид:

$$(k\Delta f)_{макс} = \frac{S}{2\pi(C_{вх} + C_{вых})}. \qquad (22)$$

Из выражения (22) видно, что коэффициент широкополосности не зависит от усиливаемой частоты, величины сопротивления нагрузки и т. п., а определяется лишь крутизной и конструктивными

Таблица 1

Обозначение	6Ж4	6Ж4 триодное включение	6Ж1П	6Ж1П триодное включение	6Ж9П	6Ж11П	6С3П 6С4П	6Н14П
Величина $\frac{S}{C_{вх}+C_{вых}}$, $\frac{ма}{в \cdot пф}$	0,62	—	0,77	—	1,55	1,6	2,33**	1,66*
Эквивалентное сопротивление шумов, *ом*	700	220	1 800	380	350	250	200	700
Входное сопротивление[1], *ком*	2—6	2—6	12—25	12—25	5	3	7	40*

[1] На частоте 60 *Мгц*.
* Для второго триода.
** Для 6С3П.

емкостями ламп. Значения коэффициентов широкополосности для наиболее распространенных ламп приведены в табл. 1.

К недостаткам каскодных усилителей относятся некоторые специфические требования, предъявляемые к лампам, используемым в них. Одним из таких требований является возможность работы при низких значениях анодного напряжения. Это требование вытекает из особенности включения ламп последовательно, в результате чего к каждой из ламп может быть приложено не более половины напряжения источника питания. Вторым требованием является высокое сопротивление изоляции между нитью подогрева и катодом верхней лампы каскодного усилителя, который непосредственно соединен с анодом нижней лампы и, следовательно, находится под высоким потенциалом. Правда, эти требования не относятся к тем схемам резонансных каскодных усилителей, у которых по постоянному току лампы включены параллельно.

Разработаны специальные типы триодов, предназначенные для применения в каскодных усилителях. К числу их относится двойной триод типа 6Н14П. Одна половина этой лампы предназначена для работы в качестве усилителя с заземленным катодом. Для уменьшения индуктивности вывода ее катод соединен с двумя запараллеленными штырьками. Это способствует повышению входного сопротивления лампы на высоких частотах, так как это сопротивление в сильной степени зависит от индуктивности катодного вывода.

В лампе конструктивным путем удалось уменьшить емкость сетка — анод, сильно влияющую на устойчивость усилителя с заземленным катодом. Вторая половина лампы, предназначенная для работы в схеме с заземленной сеткой, имеет уменьшенную междуэлектродную емкость анод — катод. Электрические же параметры обоих триодов абсолютно идентичны.

Повышение устойчивости достигается также уменьшением емкостей между анодами триодов.

По сравнению с другими лампами подобного типа в лампе 6Н14П усилена изоляция между катодом и нитью подогрева. Номинальное анодное напряжение для каждого триода равно 90 *в*, что позволяет использовать триоды в каскодном усилителе при стандартных источниках питания.

Таблица 2

Обозначение		6Н14П	6С3П	6С4П
Накал	Напряжение, *в*	6,3	6,3	6,3
	Ток, *а*	0,35	0,3	0,3
	Род накала	Косвенный	Косвенный	Косвенный
Номинальные электрические данные	Напряжение анода, *в*	90	150	150
	Сопротивление в цепи катода, *ом*	125[1]	100	100
	Ток анода, *ма*	10,5[1]	16	16
	Крутизна характеристики *ма/в*	6,8[1]	19,5	19,5
	Коэффициент усиления	25[1]	50	50
	Входное сопротивление, *ком*	40[2]	—	—
	Эквивалентное сопротивление шумов, *ом*	700	200	200
Предельные допустимые значения	Наибольшее напряжение анода, *в*	180	160	160
	Мощность, рассеиваемая анодом, *вт*	1,5[1]	3	3
	Напряжение между катодом и подогревателем, *в*	250[3]	160[3]	160[3]
Междуэлектродные емкости, *пф*	Входная	4,9[4] 2,6[5]	6,7	11,45
	Выходная	2,9[4] 1,5[5]	1,65	3,75
	Проходная	⩽0,3[4] ⩽1,8[5]	⩽2,4	⩽0,17

[1] Для каждого триода. [2] Для второго триода на частоте 60 *мгц*. [3] При отрицательном потенциале подогревателя. [4] Для первого триода (первый триод предназначен для работы в схеме с заземленной сеткой). [5] Для второго триода.
[6] В схеме с заземленной сеткой.

Хорошие результаты получаются, если в каскодном усилителе используются лампы типов 6С3П и 6С4П. Оба этих триода имеют совершенно одинаковые электрические параметры, но конструктивно они выполнены различно. Триод типа 6С3П предназначен для схемы с заземленным катодом и имеет уменьшенную индуктивность катодного вывода. У триода типа 6С4П, предназначенного для применения в схеме с заземленной сеткой, уменьшена индуктивность сеточного вывода. Благодаря различному конструктивному выполнению выводов междуэлектродные емкости этих триодов также отличаются.

По сравнению с двойным триодом типа 6Н14П триоды типов 6С3П и 6С4П имеют более высокое значение крутизны характеристики и, следовательно, меньшие шумы. Недостатками этих триодов являются увеличение вдвое числа баллонов, увеличение затрат мощности на подогрев, более высокое анодное напряжение (номинальное анодное напряжение для триодов типов 6С3П и 6С4П равно 150 *в*).

Параметры электронных ламп, предназначенных специально для применения в каскодных усилителях, приведены в табл. 2.

6. ПРИМЕР РАСЧЕТА КАСКОДНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Расчет каскодного усилителя в основном подобен расчету обычного усилителя. Для наглядности рассмотрим последовательность

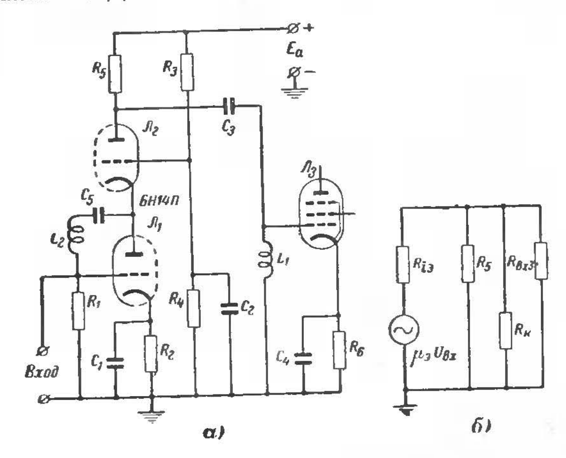


Рис. 6. Резонансный каскодный усилитель.
а — принципиальная схема; *б* — эквивалентная схема.

расчета основных параметров и режима каскодного усилителя на конкретном примере. Пусть требуется рассчитать резонансный каскодный усилитель на лампе типа 6Н14П по основной схеме. Резонансная частота усилителя f_0=30 *Мгц*, полоса пропускания на уровне 0,707 Δf=5 *Мгц*. Схема усилителя представлена на рис. 6,*а*.

Нагрузкой усилителя является резонансный контур, образованный катушкой L_1 и распределенными емкостями. Для получения заданной полосы пропускания контур зашунтирован сопротивлением R_5. Примененная схема, в которой катушка индуктивности стоит в сеточной цепи последующей лампы, а шунтирующее сопротивление в анодной цепи рассматриваемой лампы, отличается быстрым восстановлением потенциала на разделительном конденсаторе C_3, который может зарядиться сеточными токами лампы $Л_3$ при перегрузках, вызываемых сильными сигналами.

После каскодного усилителя включен усилитель на лампе типа 6Ж1П, входное сопротивление и входная емкость которой должны быть учтены при расчете.

На рис. 6,*б* приведена эквивалентная схема рассчитываемого каскодного усилителя на резонансной частоте. В этом случае контур заменяется активным сопротивлением $R_к$. Для широкополосного усилителя сопротивление параллельного контура $R_к$ при реальных величинах добротности контура намного превышает величину шунтирующего сопротивления R_5.

Входное сопротивление $R_{вх}$ лампы типа 6Ж1П на частоте 30 *Мгц* составляет десятки килоом. Поэтому можно принять, что как по постоянному, так и по переменному току эквивалентное сопротивление нагрузки каскодного усилителя $R_{э.н}=R_5$. Таким образом, эта схема полностью подобна основной схеме каскодного усилителя, приведенной на рис. 1.

Индуктивность L_1 анодного контура определяется из соотношения $\omega_0=\dfrac{1}{\sqrt{LC}}$:

$$L_1=\frac{1}{(2\pi f_0)^2(C_{вх.3}+C_{вых.2}+C_м)},$$

где $C_{вх.3}$ — входная емкость лампы $Л_3$, по справочнику $C_{вх.3}=4{,}35$ *пф*;
$C_{вых.2}=2{,}9$ *пф* — выходная емкость лампы $Л_2$;
$C_м$ — емкость монтажа; примем $C_м=8$ *пф*.

$$L_1=\frac{1}{(2\cdot 3{,}14\cdot 30\cdot 10^6)^2(4{,}35+2{,}9+8)\,10^{-12}}\approx 1{,}9\ мкгн.$$

Величину эквивалентного нагрузочного сопротивления на резонансной частоте находим по формуле, аналогичной формуле (22). Добавляем в эту формулу лишь емкость монтажа:

$$R_{э.н}=\frac{1}{2\pi\Delta f\,(C_{вх\,3}+C_{вых.2}+C_м)};$$

$$R_{э.н}=\frac{1}{2\cdot 3{,}14\cdot 5\cdot 10^6\,(4{,}35+2{,}9+8)\,10^{-12}}=2{,}1\ ком.$$

Принимаем $R_5=2{,}2$ *ком*.

Оба триода каскодного усилителя ставим в условия номинального режима для лампы типа 6Н14П. По статическим характеристикам лампы типа 6Н14П, приведенным на рис. 7, находим рабочую точку и определяем величину смещения:

$$U_{а.к1} = U_{а.к2} = 90 \text{ в}; \; I_{а.0} = 10{,}5 \text{ ма};$$

$$U_{с.к1} = U_{с.к2} = -1{,}6 \text{ в}.$$

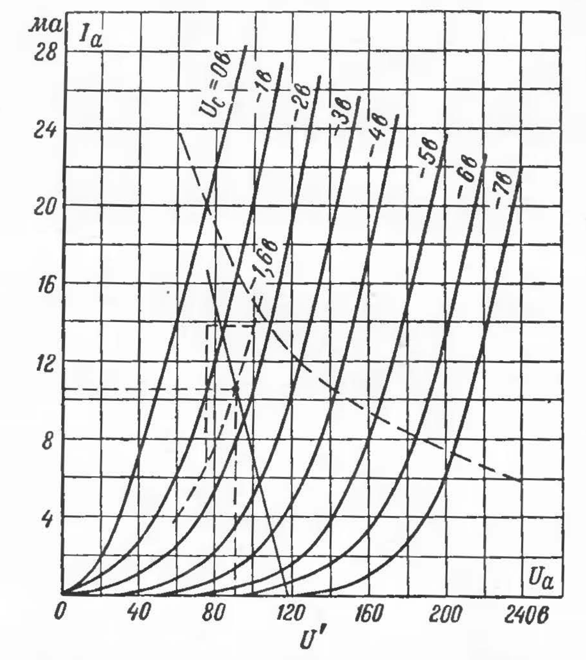


Рис. 7. Статические характеристики двойного триода 6Н14П.

Для обеспечения этого смещения величина сопротивления R_2 должна быть равна:

$$R_2 = \frac{U_{с.к1}}{I_{а.0}};$$

$$R_2 = \frac{1{,}6}{10{,}5 \cdot 10^{-3}} \approx 150 \text{ ом}.$$

Определяем напряжение на аноде лампы $Л_1$ относительно земли:

$$U_{а1} = U_{а.к1} + U_{с.к1},$$

$$U_{а1} = 90 + 1{,}6 + 91{,}6 \text{ в}.$$

Делитель из сопротивлений R_3 и R_4 должен обеспечивать требуемую величину напряжения смещения для лампы $Л_2$, равную $U_{с.к2} = -1{,}6$ *в*. Для этого потенциал сетки лампы $Л_2$ относительно земли должен быть равен:

$$U_{с2} = U_{а1} + U_{с.к2};$$

$$U_{с2} = 91{,}6 - 1{,}6 = 90 \text{ в}.$$

Величины R_3 и R_4 найдем после определения необходимого значения напряжения источника питания $E_а$. Для этого, зная величину сопротивления R_5, проведем через рабочую точку нагрузочную прямую, соответствующую этому сопротивлению. Точка пересечения этой прямой с горизонтальной осью даст нам величину напряжения U'.

Из рис. 7 графически определяем величину напряжения U':

$$U' = 116 \text{ в}.$$

Требуемая величина напряжения источника питания $E_а$ находится из формулы

$$E_а = U' + U_а;$$

$$E_а = 116 + 91{,}6 = 207{,}6 \text{ в}.$$

Принимаем $E_а = 208$ *в*. Определим величину сопротивлений R_3 и R_4, исходя из требуемого напряжения $U_{с2} = 90$ *в* и задаваясь некоторой суммарной величиной $R_3 + R_4 = 0{,}3$ *Мом* (ввиду отсутствия сеточных токов величина $R_3 + R_4$ обычно принимается в пределах от 0,1 *Мом* до 1 *Мом*):

$$R_4 = \frac{U_{с2}(R_3 + R_4)}{E_а};$$

$$R_4 = \frac{90 \cdot 0{,}3 \cdot 10^6}{208} \approx 0{,}13 \cdot 10^6 = 130 \text{ ком};$$

$$R_3 = (0{,}3 - 0{,}13)\, 10^6 = 0{,}17 \cdot 10^6 = 170 \text{ ком}.$$

В рабочей точке определяем статические параметры μ, R_i и S. Для этого на анодной характеристике (рис. 7) строим параметрический треугольник в окрестностях рабочей точки и находим статические параметры как отношение соответствующих приращений:

$$S = \frac{\Delta I_а}{\Delta U_с} \text{ при } \Delta U_а = 0;$$

$$S = \frac{7{,}4 \cdot 10^{-3}}{1} = 7{,}4 \text{ ма/в};$$

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} \text{ при } \Delta I_a = 0;$$

$$\mu = \frac{26}{1} = 26;$$

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \text{ при } \Delta U_c = 0;$$

$$R_i = \frac{26}{7{,}4 \cdot 10^{-3}} = 3{,}5 \text{ ком.}$$

Полученные результаты можно проверить, используя соотношение между статическими параметрами триода:

$$R_i = \frac{\mu}{S};$$

$$R_i = \frac{26}{7{,}4 \cdot 10^{-3}} \approx 3{,}5 \text{ ком.}$$

Далее находим эквивалентные статические параметры каскодного усилителя. В том случае, когда оба триода одинаковы, можно воспользоваться упрощенными формулами:

$$\mu_э \approx \mu^2 = 26^2 = 676;$$

$$R_{iэ} \approx R_i\mu = 3\,500 \cdot 26 = 91 \text{ ком};$$

$$S_э \approx S = 7{,}4 \text{ ма/в}.$$

Коэффициент усиления на резонансной частоте равен:

$$k = SR_5 = 7{,}4 \cdot 10^{-3} \cdot 2{,}2 \cdot 10^3 = 16{,}3.$$

Расчет величин блокировочных и разделительных конденсаторов производится обычным способом.

Настроенная в резонанс с проходной емкостью $C_{a.c1}$ первой лампы нейтрализующая индуктивность L_2 позволяет повысить устойчивость. Для лампы $Л_1$ $C_{a.c1} = 1{,}8$ *пф*. Находим L_2 по формуле

$$L_2 = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C_{a.c1}};$$

$$L_2 = \frac{1}{(2 \cdot 3{,}14 \cdot 30 \cdot 10^6)^2 \, 1{,}8 \cdot 10^{-12}} = 15 \text{ мкгн.}$$

7. РАСЧЕТ КАСКОДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Выше анализировались эквивалентные статические параметры каскодного усилителя и определялась их связь с известными статическими параметрами двух триодов. Однако аналитический метод

расчета не всегда бывает удобен на практике, когда требуется выбрать режим, учитывая большое количество условий и ограничений. Крайне желательно иметь семейство статических характеристик каскодного усилителя в целом, по которым можно выбрать рабочий режим, возможные области работы, оценить все ограничения, присущие данной схеме.

Статические характеристики каскодного усилителя (зависимость анодного тока I_{a2} от анодного напряжения U_{a2} при различных смещениях на сетке первой лампы U_{c1}, для определенного неизменного потенциала на сетке второй лампы U_{c2}) можно получить двумя способами. Первый способ заключается в экспериментальном снятии характеристик каскодного усилителя, показанного на рис. 1.

Сетка лампы $Л_2$ может быть подсоединена либо к делителю из сопротивлений (рис. 1); обеспечивающему требуемое значение напряжения на сетке лампы $Л_2$ лишь при отсутствии сеточных токов, либо к отдельному источнику постоянного напряжения с низким внутренним сопротивлением. Подсоединение сетки лампы $Л_2$ к делителю встречается гораздо чаще. В этом случае при снятии характеристик необходимо взять суммарное сопротивление R_1+R_2 такой же величины, как это будет применяться в реальной схеме (обычно 0,1—1 *Мом*), и подсоединить этот делитель к источнику постоянного напряжения, которое должно быть неизменным при снятии всех характеристик. Практически при снятии характеристик сопротивления R_1 и R_2 следует взять одинаковой величины и подключить их к источнику постоянного напряжения, равного $2U_{c2}$. Анод лампы $Л_2$ должен быть подсоединен через миллиамперметр к источнику постоянного напряжения с регулируемым выходом. Сетка лампы $Л_1$ через микроамперметр подключается к источнику постоянного напряжения с регулируемым выходом. Напряжение на сетке лампы $Л_1$ изменяется ступенями обычно через 1*в* от нулевого значения до напряжения, соответствующего режиму, близкому к запиранию лампы $Л_1$. Кривые строятся по снятым точкам, которые находятся путем измерения величин тока I_{a2} и напряжения U_{a2}. Процесс снятия семейства характеристик каскодного усилителя довольно трудоемкий. Поэтому представляет интерес второй способ получения характеристик каскодного усилителя — путем построения их по известным статическим характеристикам ламп $Л_1$ и $Л_2$. Для общности будем считать, что лампы $Л_1$ и $Л_2$ обладают различными характеристиками, показанными на рис. 8,*а* и *б*.

Построение производится в следующей последовательности. На осях I_{a2}, U_{a2} (рис. 8,*в*) в левой части графика наносятся кривые лампы $Л_1$ (рис. 8,*а*) для всех значений U_{c1} и до значений U_a, несколько превышающих величину U_{c2}.

Так как $U_{c2}=U_{a1}+U_{c.к2}$ и $U_{a1} \gg U_{c.к2}$, то статические каскодные характеристики строятся чаще всего для такого значения напряжения U_{c2}, которое принимается равным номинальному анодному напряжению для лампы $Л_1$.

Затем наносим на эти же оси I_{a2}, U_{a2} (рис. 8,*в*) кривые лампы $Л_2$ (рис. 8,*б*), но так, чтобы прежнее начало координат для этих кривых было смещено вдоль оси U_{a2} вправо на величину U_{c2}. Кривая для $U_{c.к2}=0$ начинается из этой смещенной точки, остальные кривые семейства статических характеристик лампы $Л_2$, показанные на рис. 8,*в* пунктиром, смещаются вправо еще добавочно на величину $U_{c.к2}$ для каждой из этих кривых. Это необходимо произвести

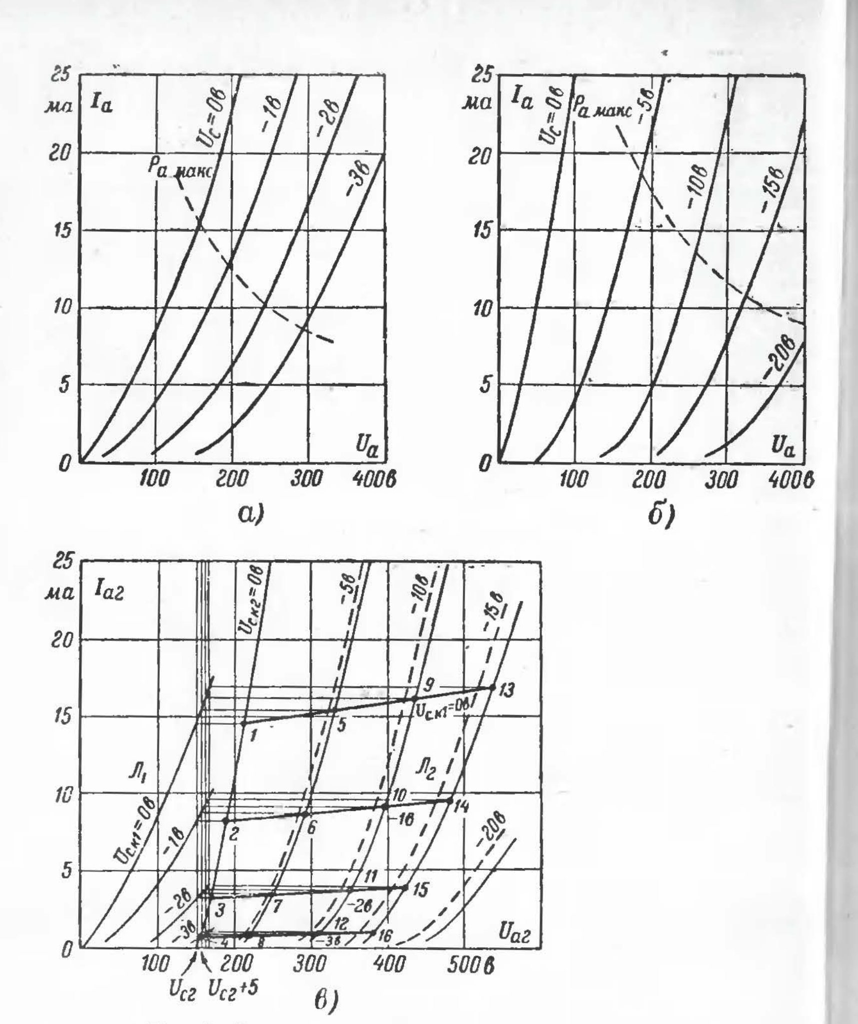


Рис. 8. Статические анодно-сеточные характеристики.
а — для лампы $Л_1$; *б* — для лампы $Л_2$; *в* — каскодного усилителя.

по той причине, что смещение $U_{с.к2}$ для лампы $Л_2$ образуется лишь в результате соответствующего повышения напряжения на катоде лампы $Л_2$, т. е. на аноде лампы $Л_1$. Кривые для лампы $Л_2$ с учетом смещения показаны на рис. 8,*в* сплошными линиями.

Далее по кривым для лампы $Л_1$ на рис. 8,*в* находятся токи, соответствующие различным значениям $U_{с.к1}=0;-1;-2$ и т. д. вольт и значению $U_{a1}=U_{c2}$, т. е. графически определяются точки пересечения кривых лампы $Л_1$ и прямой, параллельной оси ординат, проведенной на расстоянии U_{c2} от начала координат. После этого опре-

деляются точки с такими же значениями тока на кривой из семейства статических характеристик лампы $Л_2$ при $U_{с.к2}=0$ *в*. Для этого найденные ранее точки на кривых лампы $Л_1$ проектируются на кривую из семейства характеристик лампы $Л_2$ при $U_{с.к2}=0$ *в*. Полученные точки *1*, *2*, *3* и *4* соответствуют вполне определенному режиму каскодного усилителя, когда напряжение $U_{с.к2}=0$ *в*, а напряжение $U_{с.к1}$ меняется от точки к точке на 1 *в* от 0 до —3 *в*.

Точно таким же образом можно построить точки *5*, *6*, *7* и *8*, соответствующие режиму при $U_{с.к2}=-5$ *в*. При этом для обеспечения такого режима напряжение на аноде лампы $Л_1$ должно быть больше величины U_{c2} на 5 *в*. Далее опять проводим прямую, параллельную оси ординат и отстоящую от начала координат на величину $U_{c2}+5$ *в*. Точки пересечения этой прямой с кривыми лампы $Л_1$ проектируем далее на кривую из семейства статических характеристик лампы $Л_2$ при $U_{ск2}=-5$ *в*, предварительно уже смещенную вправо на 5 *в* (сплошная линия). Таким образом, получаем новый ряд точек *5*, *6*, *7* и *8*.

Аналогично строим точки *9*, *10*, *11* и *12* для смещения $U_{с.к2}=-10$ *в* и точки *13*, *14*, *15* и *16* для $U_{с.к2}=-15$ *в*.

Точки *1*, *5*, *9* и *13* соответствуют режиму каскодного усилителя при одной и той же величине смещения на сетке лампы $Л_1$, а именно при $U_{с.к1}=0$. А так как статическими характеристиками каскодного усилителя являются кривые зависимости анодного тока второй лампы от напряжения на аноде второй лампы при различных уровнях смещения на сетке первой лампы, то для получения одной кривой из этого семейства остается только соединить точки *1*, *5*, *9* и *13*. Далее соединяем между собой точки *2*, *6*, *10* и *14* и получаем еще одну кривую из семейства статических характеристик каскодного усилителя при $U_{с.к1}=-1$ *в*. Точно так же строятся и остальные кривые при $U_{с.к1}=-2$ *в*;—3 *в* и т. д.

Полученное семейство статических характеристик каскодного усилителя можно продлить и в область положительных значений напряжения $U_{с.к2}$, т. е. в область работы с сеточными токами лампы $Л_2$.

Для практических применений режим работы с сеточными токами малоприемлем, однако рассмотрение поведения каскодного усилителя для всех возможных значений изменения напряжения источника анодного напряжения представляет несомненный интерес. Строя статические анодные характеристики каскодного усилителя и определяя статические эквивалентные параметры каскодного усилителя, мы по сути дела заменяем каскодное соединение некоторой эквивалентной лампой, у которой есть, как и у обычной лампы, один вход и один выход. В случае каскодного соединения входом является цепь сетки лампы $Л_1$, а выходом — цепь анода лампы $Л_2$. Очевидно, что всякий, кто применяет каскодный усилитель, представляет себе, когда появится сеточной ток в лампе $Л_1$, и стремится не допустить этого, подавая на сетку лампы $Л_1$ начальное отрицательное смещение. Появление сеточных токов лампы $Л_1$ зависит лишь от напряжения на сетке $Л_1$ и не зависит от того, как выбрать напряжение U_{a2}. Однако при выбранной постоянной величине напряжения на сетке лампы $Л_2$ в зависимости от величины напряжения на аноде лампы $Л_2$ возможно появление сеточных токов лампы $Л_2$. Это произойдет тогда, когда напряжение на аноде лампы $Л_1$ понизится ниже напряжения U_{c2}. Другими словами, как только напряжение

U_{a2} понизится настолько, что рабочая точка перейдет в область левее кривой лампы $Л_2$ при смещении $U_{с.к2}=0$ (рис. 8,*в*) появятся сеточные токи лампы $Л_2$. В этой области анодные токи двух ламп не равны между собой, и становится справедливым следующее очевидное соотношение:

$$I_{a1}=I_{a2}+I_{c2}.$$

Большую роль в поведении статических характеристик каскодного усилителя в области сеточных токов лампы $Л_2$ играет величина общего сопротивления делителя R_1+R_2. Когда сеточные токи отсутствуют, величина U_{c2} остается неизменной. Однако с появлением сеточных токов лампы $Л_2$ начинает изменяться падение напряжения на сопротивлении R_1, а следовательно, и напряжение на сетке U_{c2}. Это в свою очередь сказывается на возможном диапазоне изменений сеточных токов лампы $Л_2$.

В связи с этим желательно рассмотреть два граничных случая: 1) случай, когда напряжение на сетке лампы $Л_2$ определяется высокоомным делителем на сопротивлениях R_1 и R_2, и 2) случай, когда напряжение на сетку лампы $Л_2$ подается от отдельного источника, имеющего очень низкое внутреннее сопротивление (например, стабилизированного источника постоянного напряжения). В первом случае сеточный ток I_{c2} лампы $Л_2$ ограничивается сопротивлением R_1 настолько, что им можно пренебречь по сравнению с величинами I_{a1} и I_{a2}. Конечно, при этом напряжение U_{c2} изменяется одновременно с изменением напряжения U_{a1} так, что разница $U_{c2}-U_{a1}=U_{с.к2}$ примерно равна нулю во всей области работы с сеточными токами лампы $Л_2$. Во втором случае возрастание сеточного тока I_{c2} лампы $Л_2$ не должно сказываться на величине напряжения U_{c2}, т. е. ток I_{c2} целиком определяется разностью потенциалов $U_{c2}-U_{a1}$.

На рис. 9 приведено построение каскодных характеристик для области работы с сеточными токами лампы $Л_2$ для случая, когда сетка лампы $Л_2$ подсоединена к высокоомному делителю. На этот рисунок перенесены полученные ранее на рис. 8, *в* статические каскодные характеристики при $U_{с.к1}=0;-1;-2;-3$ *в*, ограниченные слева точками *1*, *2*, *3* и *4*, которые принадлежат также кривой из семейства статических характеристик лампы $Л_2$ при $U_{с.к2}=0$. Слева на рис. 9 показаны статические характеристики лампы $Л_1$ при различных смещениях $U_{с.к1}$.

Продлим одну из статических каскодных характеристик, например характеристику при $U_{с.к1}=-1$ *в*, в область сеточных токов лампы $Л_2$. Теоретически можно считать, что точка *2* является критической. Режим каскодного усилителя в точке *2* соответствует следующим значениям токов и напряжений: сеточные токи обеих ламп равны нулю, анодные токи ламп равны между собой и равны значению I', показанному на рис. 9; напряжение на аноде $U'_{а.к1}$ лампы $Л_1$ равно напряжению на сетке U_{c2} лампы $Л_2$, напряжение между анодом и катодом $U'_{а.к2}$ лампы $Л_2$ определяется по характеристикам так, как это показано на рис. 9. Для построения следующей точки, левее точки *2*, задаемся значением анодного тока лампы $Л_2$ равным I'' (рис. 9). При наличии в сетке лампы $Л_2$ высокоомного делителя сеточный ток лампы $Л_2$, как уже отмечалось ранее, намного меньше анодного тока, $I_{c2} \ll I_{a2}$. Поэтому анодные токи ламп $Л_1$ и $Л_2$ примерно равны, т. е. ток лампы $Л_1$ $I_{a1}\approx I''$. Чтобы найти новое значе-

ние напряжения на аноде лампы $Л_2$, находим по-отдельности новые значения напряжений на участках анод — катод обеих ламп $U''_{а.к1}$ и $U''_{а.к2}$, как это показано на рис. 9. Затем, добавляя графически к значению $U''_{а.к1}$ величину $U''_{а.к2}$, находим новую точку, принадлежащую данной кривой из семейства статических каскодных характеристик. Аналогично на рис. 9 построены и другие точки этой кривой.

В случае, если сетка лампы $Л_2$ подключена к источнику постоянного напряжения U_{c2} с малым внутренним сопротивлением, появле-

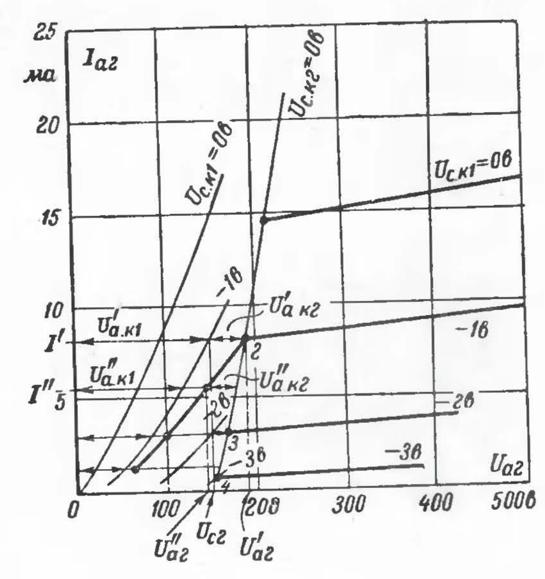


Рис. 9. Построение статических характеристик каскодного усилителя для области сеточных токов.

ние и изменения сеточного тока I_{c2} не сказываются на величине напряжения U_{c2}. С появлением сеточных токов I_{c2} сопротивление участка сетка — катод лампы $Л_2$ становится незначительным (сотни ом) по сравнению с внутренним сопротивлением по постоянному току лампы $Л_1$ (внутреннее сопротивление по постоянному току равно отношению постоянной составляющей напряжения на аноде лампы к постоянной составляющей анодного тока). Поэтому можно считать, что напряжение на аноде лампы $Л_1$ не может упасть ниже, чем на несколько вольт, по отношению к напряжению U_{c2}, т. е. $U_{a1}\approx U_{c2}$.

Из этого можно сделать вывод, что статические каскодные характеристики при понижении U_{a2} пойдут примерно по статической кривой лампы $Л_2$ для смещения $U_{с.к2}=0$ (несколько левее этой кривой).

Для всех других значений внутреннего сопротивления источника напряжения U_{c2} или величины общего сопротивления делителя R_1+R_2 статические каскодные характеристики в области сеточных токов лампы $Л_2$ займут некоторое промежуточное положение между кривой, построенной на рис. 9, и кривой лампы $Л_2$ при $U_{с.к2}=0$.

На рис. 10 показаны статические характеристики каскодного усилителя на лампе 6Н14П, построенные в соответствии с вышеизложенной методикой. Напряжение $U_{c2}=90$ *в* обеспечивается с по-

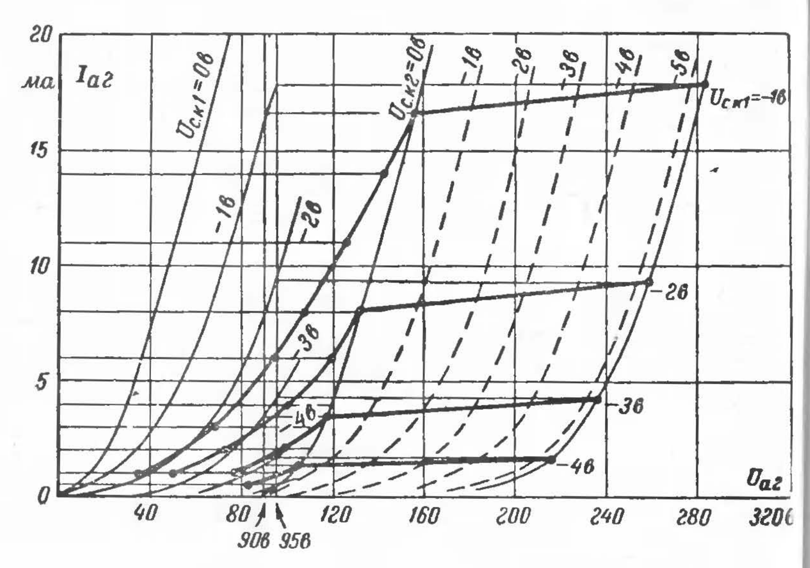


Рис. 10. Статические характеристики каскодного усилителя на лампе 6Н14П, построенные графически.

мощью высокоомного делителя на сопротивлениях R_1 и R_2. Построение проведено для следующих значений напряжения смещения на лампе $Л_1$; $U_{с.к1}=-1;-2;-3;-4$ *в*.

На рис. 11 приведены экспериментально снятые кривые для таких же значений сеточных напряжений. Напряжение на сетку лампы $Л_2$ снималось с высокоомного делителя, подключенного к отдельному источнику. Сопротивления делителя составляли по 0,25 *Мом*. При напряжении источника 180 *в* на сетку подавалось напряжение 90 *в*.

Экспериментально снятые статические характеристики каскодного усилителя на двойном триоде 6Н14П достаточно близки к построенным графически. Необходимо учитывать, что эти характеристики строились по усредненным анодно-сеточным кривым, которые отличаются в какой-то мере от кривых для данного экземпляра лампы 6Н14П. На рис. 11 крестиками отмечены те точки на каскодных характеристиках, которые соответствуют появлению сеточных токов лампы $Л_2$.

Для каскодного усилителя на этой же лампе были сняты характеристики при подключении сетки $Л_2$ к источнику напряжения +90 *в* с малым внутренним сопротивлением (рис. 12). Моменты появления сеточных токов отмечены крестиками. Ход кривых до появления сеточных токов полностью совпадает с кривыми, показанными на рис. 11. После появления сеточных токов данные кривые идут гораздо круче в соответствии с выводами, сделанными выше при

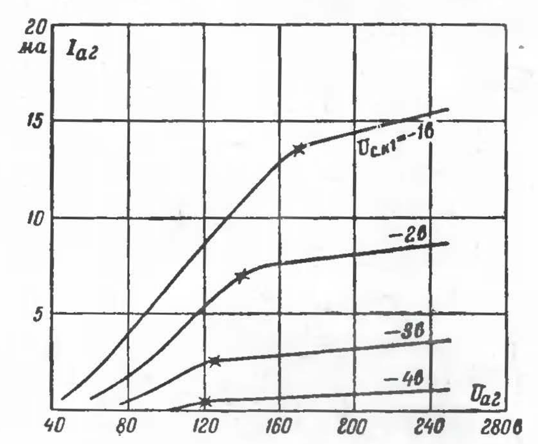


Рис. 11. Экспериментально снятые статические характеристики каскодного усилителя на лампе 6Н14П.
В цепи сетки лампы $Л_2$ включен высокоомный делитель на сопротивлениях $R_1=R_2=250$ *ком* $U_{c2}=90$ *в*.

графическом построении каскодных характеристик рис. 10. На рис. 12 приведена также зависимость сеточных токов I_{c2} от анодного напряжения U_{a2} для различных величин смещения на сетке первой лампы.

Как видно из этих кривых, сеточные токи в данной схеме могут достигать значительных величин.

Рабочая точка для обеспечения работы каскодного усилителя в линейном режиме не должна заходить левее границы, отмеченной на рис. 13 пунктирной линией *А*. На этом рисунке приведены уже ранее построенные каскодные характеристики (рис. 9) и отмечена рабочая область. Рабочая точка не должна выходить за пределы этой области. Линия *А*, ограничивающая эту область слева, является пределом, за которым возникают сеточные токи лампы $Л_2$. Эта линия идет несколько справа от статической характеристики для лампы $Л_2$ при $U_{с.к2}=0$. Сверху рабочая область ограничена линией *Б*, идущей несколько ниже статической каскодной кривой для $U_{с.к1}=0$. При переходе через линию *Б* возникают сеточные токи лампы $Л_1$.

Положение линии *В* определяется допустимой величиной мощности рассеяния для лампы $Л_2$. Эта линия переносится на данный

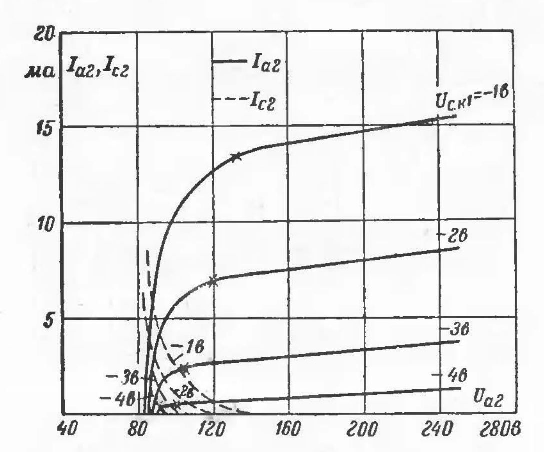


Рис. 12. Экспериментально снятые статические характеристики каскодного усилителя на лампе 6Н14П. Сетка $Л_2$ подключена к источнику напряжения $U_{c2} = 90$ *в* с малым внутренним сопротивлением.

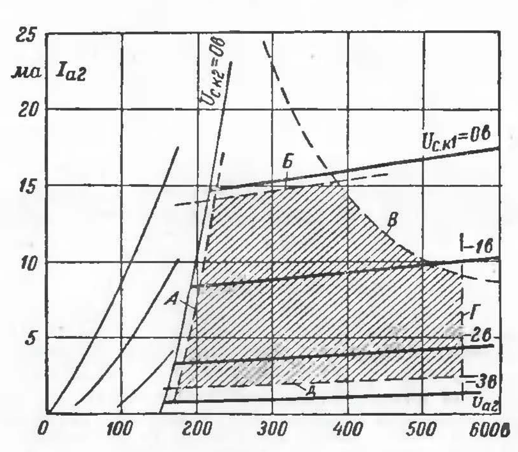


Рис. 13. Рабочая область на статических характеристиках каскодного усилителя.

рисунок со статических характеристик лампы $Л_2$, приводящихся в справочниках по радиолампам.

Линия *Г*, ограничивающая рабочую область справа, накладывает ограничение на максимальное значение напряжения источника высокого напряжения. Линия *Д* ограничивает величину нелинейных искажений, возникающих из-за сближения характеристик при больших величинах смещения. Положение линий *Г* и *Д* не является строго определенным и обусловливается областью применения каждого конкретного усилителя.

Построив каскодные статические характеристики и ограничив рабочую область, как это было описано выше, можно выбрать поло-

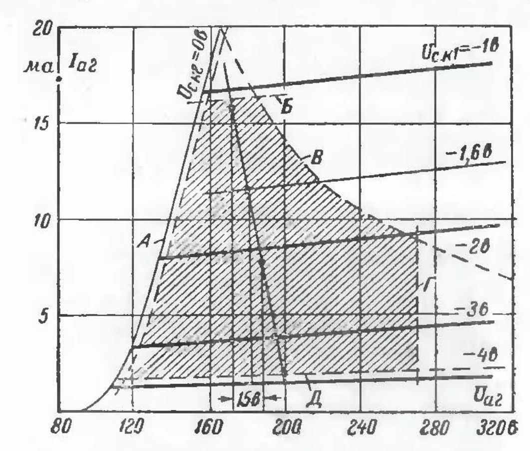


Рис. 14. К определению рабочей точки, эквивалентных параметров и коэффициента усиления каскодного усилителя на лампе 6Н14П.

жение рабочей точки и определить значение эквивалентных параметров каскодного усилителя в рабочей точке. На рис. 14 приведены каскодные характеристики и рабочая область для усилителя на лампе 6Н14П. По этим характеристикам можно определить эквивалентные статические параметры в той же рабочей точке, какая была выбрана в примере (§ 6). Эти параметры находятся методом треугольника и равны:

$$S_э = \frac{\Delta I_{a2}}{\Delta U_{с.кI}} = \frac{3,8 \cdot 10^{-3}}{0,5} = 7,6 \text{ ма/в};$$

$$\mu_э = \frac{\Delta U_{a2}}{\Delta U_{с.кI}} = \frac{340}{0,5} = 680;$$

$$R_{iэ} = \frac{\Delta U_{a2}}{\Delta I_{a2}} = \frac{340}{3,8 \cdot 10^{-3}} \approx 90 \text{ ком}.$$

Если сравнить эти результаты с полученными расчетным путем в § 6, то можно видеть близкое их совпадение.

Выбрав сопротивление нагрузки, исходя из требуемой полосы пропускания и построив нагрузочную прямую, проходящую через рабочую точку, можно найти коэффициент усиления каскодного усилителя с определенной нагрузкой. Опять возьмем сопротивление нагрузки, равное эквивалентному активному сопротивлению нагрузки, найденному в примере § 6. Это сопротивление равно 2,1 *ком*. Проведем через рабочую точку нагрузочную прямую и определим коэффициент усиления. Для этого, задавшись пределами изменений сеточного напряжения $U_{c1}=1$ *в*, определим пределы изменений анодного напряжения $U_{a2}=15$ *в*. Разделив величину изменения выходного напряжения U_{a2} на величину изменения входного напряжения U_{c1}, получим коэффициент усиления каскодного усилителя: $k=15$.

Таким образом, результаты графического расчета каскодного усилителя могут с успехом применяться для выбора режима усилителя, оценки величины усиления при требуемой величине нагрузки, определения допустимого динамического диапазона и т. д.

8. ШУМОВЫЕ СВОЙСТВА КАСКОДНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Каскодные усилители, как правило, применяются там, где требуется снизить собственные шумы до минимума. Поэтому по каскодной схеме строятся обычно входные каскады радиоприемников, так как собственные шумы всего приемника определяются в основном шумом первого каскада. Уровень шумов, возникающих в приемнике, в конечном счете определяет его чувствительность. Чем ниже уровень шума, тем более слабые сигналы можно принимать.

Коэффициентом шума усилителя называется отношение величины мощности шума на выходе реального усилителя к величине мощности шума на выходе нешумящего (идеального) усилителя с теми же коэффициентом усиления, входным и выходным сопротивлениями. Для определения коэффициента шума можно поделить отношение сигнала к шуму на входе усилителя на отношение сигнала к шуму на выходе усилителя.

Если усилитель не создает шумов, то коэффициент шума равен единице. Но во всех реальных схемах коэффициент шума всегда больше единицы. Чем ближе коэффициент шума к единице, тем совершеннее схема с точки зрения шумов.

Каскодный усилитель можно рассматривать состоящим из двух каскадов усиления. Коэффициент шума двух каскадов усиления равен:

$$Ш = Ш_1 + \frac{Ш_2 - 1}{k_p}, \qquad (23)$$

где $Ш_1$ — коэффициент шума первого каскада с заземленным катодом;

$Ш_2$ — коэффициент шума второго каскада с заземленной сеткой;

k_p — коэффициент усиления по мощности первого каскада.

Известно, что коэффициенты шума усилителей с заземленным катодом и заземленной сеткой примерно равны, т. е.

$$Ш_1 \approx Ш_2.$$

Коэффициент усиления по мощности первой ступени усиления на триоде с заземленным катодом имеет значительную величину:

$$k_p \gg 1.$$

Поэтому по формуле (23) доля шумов второго триода в общем шуме каскодного усилителя резко падает и, следовательно,

$$Ш \approx Ш_1,$$

т. е. коэффициент шума каскодного усилителя почти такой же, как коэффициент шума триодного усилителя на одном триоде.

Целесообразность применения каскодного усилителя зависит в основном от того выигрыша, который дает применение в первом каскаде триода вместо пентода. Коэффициент шума каскодного усилителя можно рассмотреть на примере резонансного каскодного усилителя, эквивалентная схема входной цепи которого показана на рис. 15,*а*.

Предполагается, что и на входе и на выходе усилителя нагрузка выполнена в виде резонансных контуров, настроенных на частоту сигнала f_0. Обозначенная на схеме емкость $C_к$ включает в себя сосредоточенную и все распределенные емкости, включая входную емкость лампы, которые имеются в сеточной цепи.

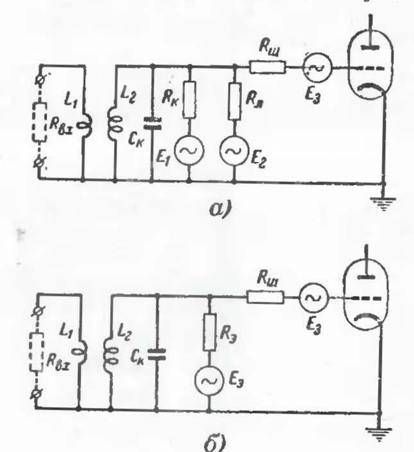


Рис. 15. Эквивалентная схема входной цепи для анализа шумов.

а — полная схема; *б* — упрощенная схема.

Сопротивление $R_л$ представляет собой входное сопротивление лампы, которое резко уменьшается с увеличением частоты, и в диапазоне УВЧ, когда усиливаемые частоты составляют несколько десятков мегагерц, становится соизмеримым с сопротивлением входной цепи. На низких частотах это сопротивление настолько велико, что его не учитывают. Сопротивление $R_л$ обусловливается двумя причинами.

Первая — это влияние времени пролета электронов, которое на больших частотах становится сравнимо с периодом колебаний. Вторая — влияние индуктивности катодного вывода лампы. Входное сопротивление убывает обратно пропорционально частоте по квадратичному закону:

$$R_л = \frac{A}{f^2}, \qquad (24)$$

где A — постоянный коэффициент;

f — частота усиливаемого сигнала.

В справочниках по электронным лампам приводятся значения входного сопротивления на определенной частоте, чаще всего 60 *Мгц* и 30 *Мгц*. Например, для лампы 6Н14П $R_л=40$ *ком* на частоте

$f=60$ *Мгц*. Для лампы 6Ж1П на той же частоте $R_л=12—25$ *ком*. В отношении входного сопротивления триоды и пентоды примерно равноценны.

По формуле (24) всегда можно найти значение сопротивления $R_л$ для любой другой частоты.

Сопротивление $R_к$ (рис. 15,*а*) учитывает эквивалентное сопротивление потерь контура, пересчитанное в параллельное контуру сопротивление, а также внешнее сопротивление, подключаемое параллельно контуру для обеспечения необходимой полосы пропускания. На полосу пропускания влияют в равной мере сопротивление $R_к$, сопротивление $R_л$, а также пересчитанное сопротивление источника входного сигнала:

$$R'_{вх}=m^2R_{вх},$$

где $R'_{вх}$ — пересчитанное сопротивление источника входного сигнала;
m — коэффициент трансформации;
$R_{вх}$ — сопротивление источника входного сигнала.

Внешнее сопротивление необходимо определять с учетом всех этих сопротивлений.

Шумы, возникающие на сопротивлении $R_л$, отличаются по своей природе от шумов, обязанных сопротивлению $R_к$. На сопротивлении $R_к$ развивается э. д. с. шума E_1, величина которой подсчитывается по формуле

$$E_1=\sqrt{4kTR_к\Delta f}, \qquad (25)$$

где $k=1{,}37\cdot10^{23}$ *дж*/абс. град. — физическая константа;
Δf — полоса пропускания, *гц*;
T — абсолютная температура, обычно для комнатных условий принимают $T=290°$.

Эти шумы объясняются беспорядочным движением заряженных частиц в самом сопротивлении.

Электродвижущая сила шума E_2 на сопротивлении $R_л$ подсчитывается по формуле

$$E_2=\sqrt{4kTt_лR_л\Delta f}. \qquad (26)$$

В этой формуле $t_л$ — постоянный коэффициент, называемый электрической температурой сопротивления $R_л$. Для большинства ламп $t_л$ находится в пределах $t_л=2{,}5—5$.

Другими словами, шумы входного сопротивления лампы больше шумов, возникающих на омическом сопротивлении той же величины, находяшемся в комнатных условиях. Поэтому даже в том случае, когда для получения требуемой полосы пропускания контур должен быть шунтирован добавочным внешним омическим сопротивлением, желательно выбирать лампу с большими значениями входного сопротивления.

Электродвижущие силы шума E_1 и E_2 показаны на рис. 15,*а* включенными последовательно с сопротивлениями $R_к$ и $R_л$. Всегда можно на эквивалентной схеме заменить параллельно включенные сопротивления $R_к$ и $R_л$ одним эквивалентным сопротивлением $R_э$ (рис. 15,*б*) так, чтобы

$$\frac{1}{R_э}=\frac{1}{R_к}+\frac{1}{R_л}.$$

Это сопротивление будет иметь свою электрическую температуру $t_э$, находящуюся в зависимости от соотношения сопротивлений $R_к$ и $R_л$ в пределах от 1 до $t_л$. Величину $t_э$ можно определить по формуле

$$t_э=\frac{R_л+R_кt_л}{R_л+R_к}.$$

Когда $R_к\gg R_л$, величина $t_э$ будет приближаться к $t_л$. Когда $R_к\ll R_л$, величина $t_э$ стремится к единице; э. д. с. шумов на сопротивлении $R_э$ подсчитывается по формуле

$$E_э=\sqrt{4kTt_эR_э\Delta f}. \qquad (27)$$

Следует учитывать, что вследствие зависимости $R_л$ от частоты (24) величины $R_э$ и $t_э$ также зависят от частоты.

Формула (27) в большинстве практических случаев дает удовлетворительные результаты, так как обычно отношение полосы пропускания Δf к несущей частоте f_0 в резонансных усилителях намного меньше единицы.

Сопротивление $R_ш$, обозначенное на рис. 15, является фиктивным сопротивлением, по величине которого судят о шуме применяемой лампы. Вследствие флуктуаций анодного тока, вызываемых тем, что в каждую единицу времени катод покидает неодинаковое количество электронов, к уже рассмотренным источникам шумов добавляется еще шум лампы, часто называемый дробовым эффектом. Флуктуации анодного тока увеличиваются при перераспределении электронов между положительными электродами. Поэтому шумы многосеточных ламп больше шумов триода. Обычно для удобства рассмотрения шумовых свойств усилителя считают, что флуктуации анодного тока лампы обязаны сопротивлению $R_ш$, а саму лампу на эквивалентной схеме считают нешумящей идеальной лампой. Величина шумового сопротивления лампы приводится в справочниках по электронным приборам. Эта величина остается неизменной для данной лампы в широком диапазоне частот. И только на самых низких частотах $R_ш$ увеличивается вследствие медленных флуктуаций за счет изменения структуры катода.

Величина $R_ш$ для триодов подсчитывается по формуле

$$R_ш\approx\frac{2{,}5\div3}{S},$$

где S — крутизна характеристики лампы.

Для пентода величина $R_ш$ значительно больше (обычно в 3—5 раз) и равна:

$$R_ш\approx\frac{2{,}5}{S}+\left(\frac{20I_э}{S^2}\right)\frac{I_а}{I_а+I_э},$$

где $I_а$ — анодный ток пентода;
$I_э$ — ток цепи экранирующей сетки.

На эквивалентной схеме (рис. 15) сопротивление $R_ш$ включено так, что оно не шунтирует контур; э. д. с. шумов, возникающих на сопротивлении $R_ш$, подсчитывается по обычной формуле:

$$E_з = \sqrt{4kTR_ш \Delta f}\,.$$

Источник сигнала, подключаемый к входным клеммам усилителя (первичной обмотке трансформатора, в случае трансформаторной связи), имеет свое собственное сопротивление $R_{вх}$, которое будет пересчитываться в контур как сопротивление $R'_{вх}$.

Для передачи максимальной мощности от источника в контур величина коэффицента трансформации должна быть

$$m_м = \sqrt{\frac{R_э}{R_{вх}}}\,.$$

Вследствие того, что пересчитанное сопротивление подключается параллельно к $R_э$, а $R_ш$ соединено с ними двумя последовательно, получается довольно сложная зависимость для определения оптимального коэффициента трансформации с точки зрения шумов $m_ш$. При величинах $R_ш$, соизмеримых с $R_э$, коэффициент трансформации $m_ш$ несколько меньше величины $m_м$.

Именно из-за того, что величина $R_ш$ триода в несколько раз меньше $R_ш$ пентода с той же крутизной, выгодно во входных каскадах применять триоды. Применение каскодного усилителя, обладающего большой устойчивостью, позволяет избежать опасности самовозбуждения. Однако из рассмотрения эквивалентной схемы рис. 15,*б* можно сделать вывод, что особенно эффективно применение каскодного усилителя вместо пентодного там, где входной контур широкополосный, т. е. величина $R_э$ мала. В этом случае шум, развиваемый на сопротивлении $R_ш$, играет основную роль.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПРИМЕНЕНИЕ КАСКОДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

9. УСИЛИТЕЛЬ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ПРИЕМНИКА

В примере гл. 1 и при рассмотрении шумовых свойств приводилась схема резонансного каскодного усилителя (рис. 5 и 15). Такая схема может быть положена в основу разработки схем усилителей высокой и промежуточной частот радиоприемных устройств. Ниже будут рассмотрены конкретные схемы, применяемые в различной радиоприемной аппаратуре.

В современных телевизорах, обладающих высокой чувствительностью, сигнал из антенны обычно подается на каскодный усилитель высокой частоты. Конструктивно каскодный усилитель размещается в блоке переключателя телевизионных каналов.

На рис. 16 приведена принципиальная схема каскодного усилителя высокой частоты в переключателе телевизионных каналов ПТК-1, выполненного на двойном триоде типа 6Н14П. Триоды включены и по постоянному и по переменному току последовательно. На разных диапазонах катушки L_1, L_2, L_3 и L_4 переключаются с помощью барабанного переключателя, который на схеме опущен.

Смещение на сетку левой половины лампы $Л_1$ подается от регулятора контрастности. Смещение на правой половине лампы $Л_1$ зависит от соотношения сопротивлений R_4 и R_5.

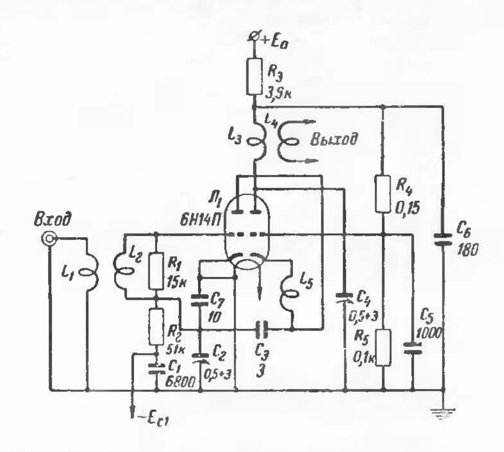


Рис. 16. Схема каскодного усилителя высокой частоты телевизионного приемника.

Связь с антенной — индуктивная. Сеточный контур зашунтирован добавочно постоянным сопротивлением R_1. Емкостью контура служат распределенные емкости лампы и монтажа.

Конденсаторы C_2 и C_3 вместе с междуэлектродными емкостями $C_{а.\,с}$ и $C_{с.\,к}$ левой половины лампы $Л_1$ образуют мост, в одну диагональ которого включена катушка индуктивности L_2, в другую участок анод — катод левой половины лампы $Л_1$. При сбалансированном мосте происходит нейтрализация емкости $C_{а.\,с}$. Это повышает устойчивость усилителя, а также устраняет пролезание напряжения гетеродина из выходной цепи лампы в антенную цепь.

Катушка L_5 настраивается в резонанс с распределенными емкостями на частоту примерно 140 *Мгц* так, чтобы выровнять усиление на 1-м и 12-м телевизионных каналах. Контур, образованный этой катушкой и распределенными емкостями, имеет очень тупую настройку из-за шунтирующего действия входного сопротивления правой половины лампы $Л_1$. Поэтому нет надобности в переключении катушки L_5 при переходе с диапазона на диапазон.

Катушка L_3 совместно с конденсатором C_4 и распределенными емкостями образует выходной контур каскодного усилителя. Этот контур индуктивно связан с сеткой смесительной лампы, куда заводится также напряжение гетеродина.

10. ШИРОКОПОЛОСНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ ЛАМП ПО ПОСТОЯННОМУ ТОКУ

Принципиальная схема усилителя приведена на рис. 17. По высокой частоте лампы $Л_1$ и $Л_2$ включены последовательно, т. е. переменная составляющая анодного тока в обеих лампах одна и та же. Поэтому все свойства каскодного усилителя, рассмотренные ранее, в равной степени относятся и к данной схеме. Особенностью схемы является то, что по постоянному току лампы $Л_1$ и $Л_2$ включены параллельно. Это позволяет применить источник анодного питания, имеющий в 2 раза меньшее напряжение.

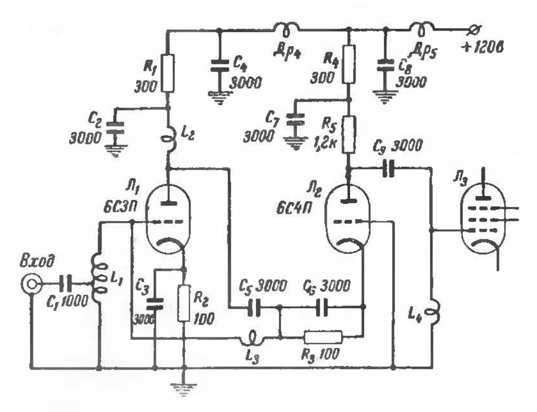


Рис. 17. Схема каскодного усилителя с параллельным включением ламп по постоянному току.

Использование в качестве ламп $Л_1$ и $Л_2$ триодов с большой крутизной позволяет понизить шумы.

Сигнал от входного высокочастотного разъема подается через разделительный конденсатор C_1 на часть катушки L_1. Катушка L_1 совместно с емкостями схемы настроена на промежуточную частоту. Автотрансформаторное включение катушки позволяет согласовать сеточный контур с источником входного сигнала по наименьшим шумам.

Полоса пропускания сеточного контура определяется входным сопротивлением лампы $Л_1$, эквивалентным сопротивлением потерь катушки L_1, а также пересчитанным сопротивлением источника входного сигнала (в данном случае пересчитывается волновое сопротивление коаксиального кабеля).

Лампа $Л_1$ нагружена на низкое входное сопротивление лампы $Л_2$. Индуктивность L_2 настраивается с распределенными емкостями на усиливаемую частоту. Индуктивность L_3 настраивается в резонанс с проходной емкостью $C_{а.с}$ лампы $Л_1$. Этим несколько повышается устойчивость первой ступени на лампе $Л_1$. Кроме того, ка-

тушка L_3 служит для того, чтобы замкнуть катод лампы $Л_2$ на землю по постоянному току.

Режим ламп $Л_1$ и $Л_2$ обеспечивается выбором напряжения анодного питания и напряжений смещения. В данной схеме смещение как для лампы $Л_1$, так и для лампы $Л_2$ образуется за счет катодного тока соответствующей лампы. Требуемая величина напряжения смещения достигается выбором сопротивлений R_2 и R_3.

Анодной нагрузкой лампы $Л_2$ служит контур, образованный индуктивностью L_4 и распределенными емкостями. Контур по высокой частоте зашунтирован сопротивлением R_5, которое выбирается, исходя из требуемой полосы пропускания.

11. УСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ АНТЕННОЙ ПРИСТАВКИ

При дальнем приеме телевидения часто используются антенные усилители, располагаемые рядом с антенной. Поступающий на антенный усилитель сигнал усиливается и затем по кабелю подается на телевизор. На рис. 18 показана антенная приставка, выполненная на

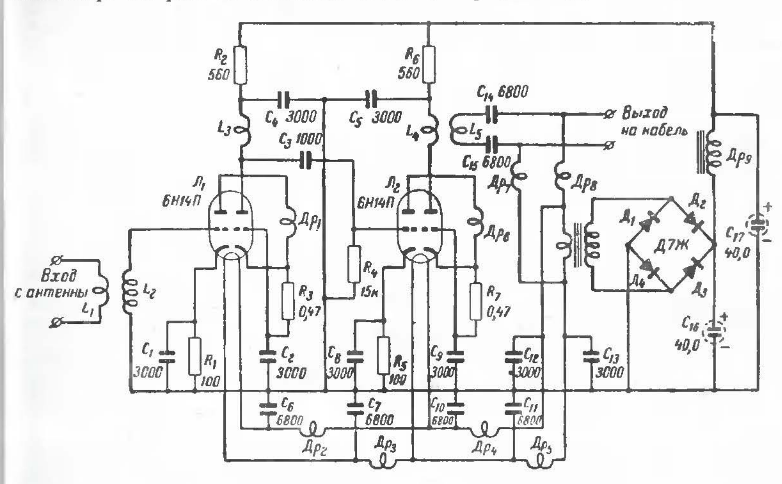


Рис. 18. Схема каскодного усилителя для антенной приставки.

каскодных усилителях. Применение каскодного усилителя на входе непосредственно после антенны позволяет повысить отношение сигнала к шуму и этим самым увеличить дальность приема телевизионных программ.

К особенностям этой схемы следует отнести способ образования смещения на сетках правых половин триодов. Небольшое отрицательное смещение образуется за счет гридликов R_3C_2 и R_7C_9, включенных в сеточные цепи ламп, так как некоторый сеточный ток имеет место в лампе даже при небольшом отрицательном смещении. За счет этого и смещается рабочая точка.

Питание приставки осуществляется по тому же двухпроводному кабелю, по которому высокочастотный сигнал подается с приставки на телевизор. На приставку по этому кабелю подается напряжение 6,3 *в* частоты 50 *гц*. На обоих концах кабеля производится разделение сигнала высокой частоты и напряжения 50 *гц*.

12. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КАСКОДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Возможность получения в каскодном усилителе очень высокого усиления при низком уровне собственных шумов используется и в усилителях низкой частоты. Полоса пропускания каскодного усилителя, как и обычного усилителя, определяется величиной суммарной емкости, подключенной параллельно анодной цепи, и сопротивлением анодной нагрузки усилителя. Относительно узкая полоса частот, которые необходимо усиливать для неискаженного воспроизведения музыки и речи (всего около 15 *кгц*), допускает сужение полосы пропускания усилителя. При этом величина сопротивления анодной нагрузки может доходить до значений $R_н > R_{i.э}$. В гл. 1 было показано, что в этом случае усиление каскодного усилителя близко к максимально возможному, т. е. $\mu_э$.

В усилителях низкой частоты, особенно в тех, которые имеют высокоомный вход, важное значение имеет величина входной емкости. В случае наличия в анодной цепи чисто активной нагрузки входная динамическая проводимость лампы приобретает чисто емкостной характер. Для триодного усилителя с заземленным катодом на основании зависимостей (18) и (19) можно получить следующее выражение входной емкости, обусловленное связью через емкость $C_{а.с}$:

$$C'_{вх.1} = C_{а.с}(1 + k).$$

При больших k эта величина у триодных усилителей может достигать сотен пикофарад. У каскодного усилителя первый триод работает с коэффициентом усиления, близким к единице. Поэтому для каскодного усилителя величина $C'_{вх.1}$ значительно уменьшается и равна:

$$C'_{вх.1} = 2C_{а.с}.$$

Эти особенности объясняют широкое применение каскодных усилителей в микрофонных каскадах и предварительных усилительных каскадах каналов воспроизведения магнитной записи, т. е. в усилителях, работающих при очень низких уровнях входного сигнала. Как известно, такие усилители должны обладать наибольшим возможным усилением при наименьшем уровне собственных шумов.

Каскодные усилители находят применение и в электронных стабилизаторах напряжения. Применение в них каскода позволяет существенно улучшить параметры электронного стабилизатора напряжения.

Фактически, каскодный усилитель имеет два независимых элемента управления: сетки первого и второго триодов. Эта особенность позволяет использовать каскод в усилителях с двойным управлением и избирательных усилителях, значительно расширяя его

возможности. Наконец, многочисленные видоизменения основной схемы каскодного усилителя в сочетании с возможностью двойного управления обладают особыми свойствами, характерными лишь для этих схем.

Примеры практического применения различных каскодных усилителей низкой частоты, их параметры и особенности приводятся ниже.

13. МИКРОФОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Характерные особенности каскодного усилителя наиболее полно используются в микрофонных каскадах и предварительных усилителях каналов воспроизведения магнитной записи, отличающихся очень низким уровнем входного сигнала. Каскодный входной усилитель позволяет обеспечить в этом случае превышение сигнала над шумом, достаточное для качественного воспроизведения звука.

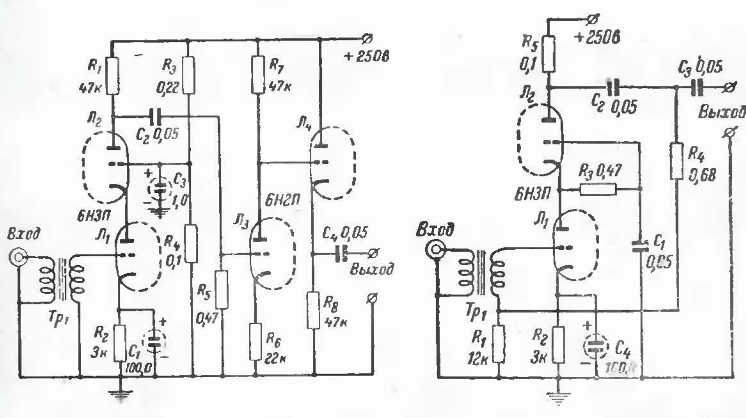


Рис. 19. Схема микрофонного каскодного усилителя.

Рис. 20. Схема микрофонного каскодного усилителя с отрицательной обратной связью.

Принципиальная схема и расчет низкочастотных каскодных усилителей практически не отличаются от высокочастотных. Полная принципиальная схема микрофонного усилителя приведена на рис. 19. Усилитель предназначен для работы с динамическим микрофоном и имеет полный коэффициент усиления 51 *дб*.

Недостатком такого усилителя является применение в нем фиксированного смещения верхнего триода. При изменении параметров лампы изменяется и ее режим. Этот недостаток может быть устранен применением автоматического смещения, создаваемого сеточным током лампы $Л_2$ на сопротивлении R_3 (рис. 20). По напряжению сигнала сетка лампы $Л_2$ заземлена через конденсатор C_1.

Для повышения линейности усилителя и расширения его динамического диапазона может быть введена отрицательная обратная связь. Выходное напряжение с анодной нагрузки каскода подается

через переходной конденсатор на делитель напряжения R_4R_1. Напряжение обратной связи приложено к сетке лампы $Л_1$.

К микрофонным каскодным усилителям предъявляются требования, аналогичные требованиям к обычным входным каскадам, работающим при низком уровне входного сигнала: тщательный монтаж, экранировка входных цепей, предохранение лампы от вибраций для предотвращения микрофонного эффекта и др.

14. УСИЛИТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ОЧЕНЬ БОЛЬШИМ УСИЛЕНИЕМ

В ряде электронных схем бывает необходимо получить очень высокие значения усиления при достаточной устойчивости работы усилителя. Например, от величины коэффициента усиления управляющего усилителя зависит выходное сопротивление, следовательно,

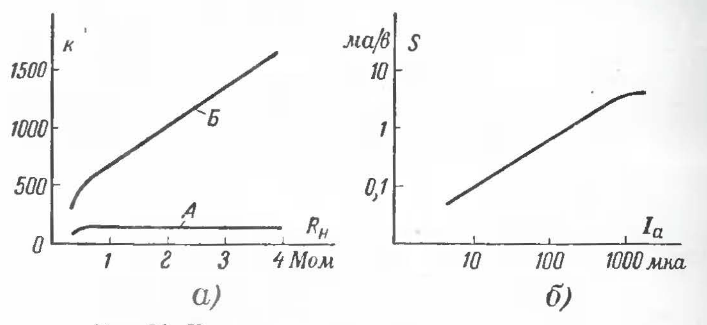


Рис. 21. Характеристики каскодного усилителя.

а — зависимость усиления от величины сопротивления нагрузки; *б* — зависимость крутизны от анодного тока.

и эффективность работы электронного стабилизатора напряжения. Величина его выходного сопротивления оперделяется выражением

$$R_{вых} = 1/S_п k_у, \tag{28}$$

где $S_п$ — крутизна характеристики последовательной лампы;

$k_у$ — коэффициент усиления управляющей лампы.

Типовой усилитель на пентоде в этой схеме имеет коэффициент усиления $k_у = 100$, и при крутизне характеристики последовательной лампы $S_п = 5$ *ма/в* выходное сопротивление стабилизатора составляет $R_{вых} = 2$ *ом*.

Как видно из выражения (12), усиление каскодного усилителя линейно увеличивается с величиной анодной нагрузки. Однако беспредельно увеличивать сопротивление анодной нагрузки нельзя. Дело в том, что напряжение анодного питания управляющего усилителя имеет постоянную величину, равную выходному напряжению стабилизатора. Поэтому при увеличении сопротивления анодной нагрузки уменьшается анодный ток триодов каскодного усилителя. Как показали измерения, с уменьшением анодного тока триода уменьшается значение его крутизны. Поэтому при увеличении сопротивления анодной нагрузки $Л_2$ свыше некоторого предела соответствующего роста усиления каскода нет (кривая *А* на рис. 21,*а*). Зависимость крутизны триода от анодного тока, снятая при очень малых значениях входного сигнала (менее 1 *мв*), приведена на рис. 21,*б*. Из этого рисунка видно, что в диапазоне изменений анодного тока от 5 до 500 *мка* крутизна характеристики изменяется линейно. Для этой области (т. е. для случая работы с очень большими величинами сопротивления анодной нагрузки) выражение для коэффициента усиления может быть записано так:

$$k_у = nI_aR_н. \tag{29}$$

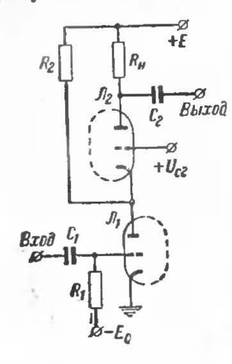


Рис. 22. Каскодный усилитель с увеличенным током нижней лампы.

Поэтому если при увеличении сопротивления анодной нагрузки $R_н$ анодный ток I_a соответственно падает (а именно это происходит в случае постоянства напряжения анодного питания), то коэффициент усиления, начиная с некоторой величины $R_н$, не растет и остается постоянным.

Коэффициент усиления каскодного усилителя с очень большим сопротивлением анодной нагрузки может быть повышен увеличением крутизны характеристики нижней лампы каскода. Для этого, как это следует из рис. 21,*б*, через лампу $Л_1$ должен протекать достаточно большой ток. В схеме каскодного усилителя, изображенной на рис. 22, увеличение анодного тока лампы $Л_1$ достигается подключением ее анода через добавочное сопротивление R_2 к источнику анодного питания.

S и R_i триода изменяются при изменении анодного тока, однако их произведение, равное μ, остается постоянным. Это означает, что в случае применения в каскоде одинаковых ламп, когда токи ламп различны, соотношения между параметрами этих ламп будут следующими:

$$R_{i1} \neq R_{i2};\ S_1 \neq S_2;\ \mu_1 = \mu_2 = \mu.$$

Вспомним, что точное выражение для коэффициента усиления каскодного усилителя (8)

$$k = \frac{\mu_1(\mu_2 + 1)R_н}{R_н + R_{i1}(\mu_2 + 1) + R_{i2}}.$$

В случае применения одинаковых ламп, но с различными анодными токами

$$k = \frac{\mu(\mu + 1)R_н}{R_н + R_{i1}(\mu + 1) + R_{i2}} \approx \frac{\mu^2 R_н}{R_н + R_{i1}\mu + R_{i2}}.$$

Разделив числитель и знаменатель правой части этого выражения на μR_{i1}, получим, что коэффициент усиления каскода прямо пропорционален крутизне первого триода:

$$k \approx \frac{S_1 R_н}{1 + \dfrac{R_н + R_{i2}}{\mu R_{i1}}}. \qquad (30)$$

Результаты экспериментального исследования усиления каскодного усилителя с увеличенным током нижней лампы приведены на рис. 21,*а* (кривая *Б*). Если в обычном каскодном усилителе при увеличении нагрузочного сопротивления от 200 *ком* до 4 *Мом* уси-

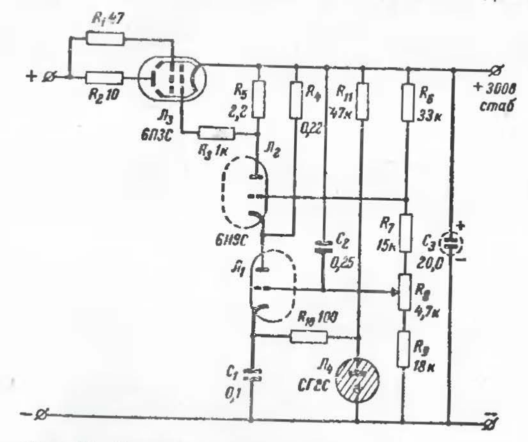


Рис. 23. Электронный стабилизатор напряжения с каскодным управляющим усилителем.

ление оставалось примерно постоянным — около 100 (кривая *А*), то в схеме с добавочным током нижнего триода усиление непрерывно растет и достигает значения 1 700 при сопротивлении анодной нагрузки 4 *Мом*. При снятии обеих характеристик, изображенных на рис. 21,*а*, режим верхнего триода выбирался так, чтобы падение напряжения на сопротивлении анодной нагрузки оставалось постоянным.

Полная схема электронного стабилизатора напряжения, в котором в качестве управляющего усилителя использована каскодная схема с очень высоким коэффициентом усиления, показана на рис. 23. Стабилитрон $Л_4$, подключенный к катоду нижней лампы каскода $Л_1$, служит для создания опорного напряжения $U_{оп}$. Падение напряжения на стабилитроне постоянно и практически не зависит от колебаний напряжения питания. Часть выходного напряжения электронного стабилизатора $U_{ст}$ снимается с делителя напряжения R_6—R_9 и прикладывается к сетке лампы $Л_1$. Между сеткой и катодом лампы $Л_1$ оказывается приложенной разность опорного напряжения и части напряжения на выходе электронного стабилизатора:

$$U_р = U_{оп} - U_{ст}.$$

Параметры делителя напряжения выбираются такими, чтобы разностное напряжение было равно напряжению смещения лампы $Л_1$ в рабочей точке. Тогда падение напряжения на анодной нагрузке каскода R_5 будет равно напряжению смещения лампы $Л_3$ в рабочей точке. При отклонении величины выходного напряжения электронного стабилизатора от заданного значения между сеткой и катодом $Л_1$ оказывается приложенным напряжение, измененное на величину $\Delta U_{ст}$ относительно начального смещения. Обычно $\Delta U_{ст}$ называют сигналом ошибки. Усиленный каскодным усилителем сигнал ошибки прикладывается к сетке лампы $Л_3$, изменяя ее внутреннее сопротивление. Соответственно изменяется и выходное напряжение стабилизатора.

Очевидно, что чем больше усиление каскодного усилителя, тем при меньших значениях сигнала ошибки происходит изменение внутреннего сопротивления лампы $Л_3$, достаточное для компенсации этого сигнала ошибки, т. е. тем выше стабильность выходного напряжения электронного стабилизатора.

Стабилитрон, являющийся источником опорного напряжения, обладает достаточно большим внутренним сопротивлением. На этом сопротивлении, включенном между катодом лампы $Л_1$ и землей, создается за счет анодного тока $Л_1$ отрицательная обратная связь. Это приводит к уменьшению коэффициента усиления управляющего усилителя по переменному току. Для устранения обратной связи стабилитрон шунтируется конденсатором C_1. Чтобы исключить возможность возникновения релаксационных колебаний, к которым склонны схемы со стабилитроном, между лампой $Л_4$ и конденсатором C_1 поставлено сопротивление R_{10}.

При сопротивлении анодной нагрузки каскода $R_5 = 2{,}2$ *Мом* и полной емкости сеточной цепи лампы $Л_3$ относительно земли, равной 32 *пф*, полоса пропускания управляющего усилителя (при неравномерности амплитудно-частотной характеристики, равной 3 *дб*) составляет 2,5 *кгц*.

В связи с высоким коэффициентом усиления управляющего усилителя серьезное внимание обращается на его защищенность от наводок переменного тока. Как показала практика, шумы на выходе каскодного усилителя с очень большим коэффициентом усиления определяются в первую очередь наводками на сетку лампы $Л_1$. Уменьшение фона шумов достигается тщательным выполнением монтажа элементов и соединений сеточной цепи лампы $Л_1$ и применением относительно низкоомного делителя на сопротивлениях $R_6 \div R_9$. Конденсатор C_2 шунтирует верхнее плечо делителя напряжения, повышая его коэффициент передачи на высших рабочих частотах. При выполнении всех мер предосторожности уровень шума на выходе управляющего усилителя, состоящего из наводок за счет цепей накала на сетку первой лампы и собственных шумов усилителя, не превышает 100—200 *мкв*.

Выходное сопротивление электронного стабилизатора напряжения с каскодным управляющим усилителем составляет 0,5 *ом* для постоянного тока и уменьшается до 0,2 *ом* для частот до 30 *кгц* за счет действия конденсаторов C_1 и C_3.

Одним из недостатков изображенной на рис. 23 схемы электронного стабилизатора напряжения с каскодным усилителем является узкая полоса пропускания управляющего усилителя. Она определяется величиной шунтирующих анодную нагрузку каскода емко-

стей, из которых преобладающее значение имеет входная емкость мощной лампы $Л_3$. Во многих случаях в качестве лампы $Л_3$ включаются в параллель несколько одинаковых ламп. Тогда соответственно увеличивается и входная емкость.

Улучшение частотных свойств каскодного усилителя с высокоомной нагрузкой может быть получено введением катодного повторителя между анодной нагрузкой управляющего усилителя и сеткой последовательной лампы. Модифицированная схема электронного

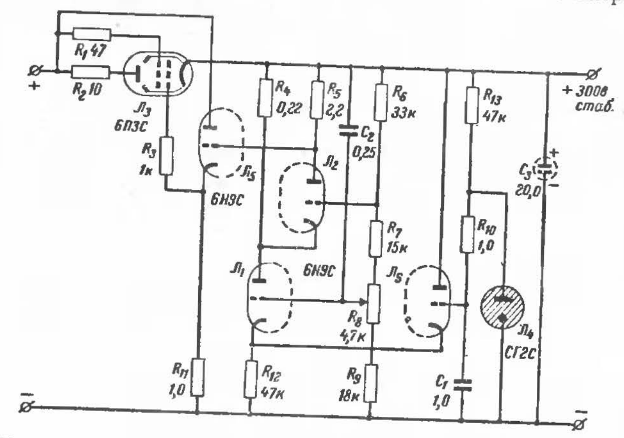


Рис. 24. Улучшенная схема электронного стабилизатора напряжения.

стабилизатора показана на рис. 24. Как известно, входная емкость катодного повторителя на триоде, равная

$$C_{вх} \approx C_{с.а} + C_{с.к}(1 - k_1),$$

значительно меньше входной емкости обычного усилительного каскада $C_{вх} \approx C_{с.\,а} + C_{с.\,к}$ за счет введения отрицательной обратной связи (k_1— коэффициент передачи катодного повторителя, обычно близок к единице). В связи с тем, что коэффициент передачи катодного повторителя практически не зависит от колебаний напряжения анодного питания, анод лампы $Л_5$ может быть соединен непосредственно с выпрямителем.

Рассматриваемый каскодный усилитель, являющийся практически усилителем постоянного тока, обладает общим для УПТ недостатком: его выходное напряжение зависит от напряжения питания накальных цепей. В рабочем режиме анодный ток лампы ограничен лишь потенциалами электродов. Изменение напряжения на нити накала приводит к изменениям среднего значения начальных скоростей эмиттируемых катодом электронов. Это вызывает соответствующее изменение анодного тока лампы при постоянных потенциалах электродов. Для обычного усилителя постоянного тока, где анодный ток мал по сравнению с током эмиссии катода, этот эффект

практически независим от величины анодного напряжения. При колебаниях сетевого напряжения в пределах ±10% выходное напряжение стабилизатора, изображенного на рис. 24, за счет изменения величины анодного тока каскода меняется на ±0,4 *в*.

Для поддержания анодного тока каскода постоянным может быть использована широко распространенная схема катодной компенсации. Установлено, что увеличение напряжения на подогревателе на 10% эквивалентно уменьшению потенциала катода на 100 *мв*. Это изменение можно компенсировать введением в катод равного напряжения противоположного знака. Обычно компенсация осуществляется подключением к катоду лампы $Л_1$ компенсируемого усилителя катода второй лампы $Л_6$, включенной по схеме катодного повторителя. В простейшем случае, когда лампы $Л_1$ и $Л_6$ заключены в один баллон и их параметры одинаковы, можно считать, что изменение напряжения на катодном сопротивлении ламп за счет тока $Л_6$ полностью компенсирует изменение тока в лампе $Л_1$.

Лампы $Л_1$ и $Л_6$ на рис. 24, выполненные в виде двойного триода, поставлены практически в одинаковый режим, так как опорное напряжение со стабилитрона $Л_4$, приложенное к сетке $Л_6$, лишь на 1—1,5 *в* отличается от напряжения, приложенного к сетке лампы $Л_1$. Высокоомный вход катодного повторителя $Л_6$ позволил применить сглаживающий фильтр $R_{10}C_1$ с большой постоянной времени в цепи опорного напряжения.

В этой схеме при изменении напряжения сети в пределах ±10% выходное напряжение стабилизатора изменяется всего лишь на 70 *мв* при выходном напряжении +300 *в*.

15. ЭЛЕКТРОННЫЙ ИНТЕГРАТОР НАПРЯЖЕНИЯ

Еще более жесткие требования на стабильность предъявляются к усилителям постоянного тока, применяемым, например, в схеме электронного интегратора напряжения. Интегрирующие усилители, выходное напряжение которых пропорционально интегралу входного сигнала, получили широкое распространение в вычислительных устройствах, схемах точного измерения промежутков времени и многих других. В частности на том свойстве, что интегралом некоторой постоянной величины является линейно возрастающая функция, основано применение интегрирующих усилителей для получения пилообразного напряжения развертки с очень высокой линейностью для точных электронных приборов. Входным сигналом такого усилителя является постоянное напряжение. Линейность выходного напряжения интегратора зависит в первую очередь от стабильности усилителя постоянного тока.

Принцип работы интегрирующего усилителя следующий. Если в усилителе создать очень сильную отрицательную обратную связь путем подачи его выходного напряжения на вход через цепь обратной связи Z_0 (рис. 25,*а*) так, чтобы напряжение обратной связи было противофазно входному сигналу, то при очень большом коэффициенте усиления усилителя потенциал на входном зажиме остается практически постоянным при любых изменениях входного сигнала. Это происходит потому, что любому изменению входного сигнала соответствует противодействующее изменение сигнала обратной связи, компенсирующее изменение потенциала на входе. Если входная

цепь усилителя не потребляет ток, то выходное напряжение такого усилителя равно:

$$U_{\text{вых}} = -IZ_{\text{o}},$$

где Z_{o} — сопротивление цепи обратной связи.

Если напряжение сигнала подается через последовательное сопротивление $R_{\text{вх}}$, а цепь отрицательной обратной связи образована конденсатором C, то выходное напряжение усилителя равно:

$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{R_{\text{вх}}C}\int U_{\text{вх}}\,dt, \qquad (31)$$

т. е. входное напряжение такого усилителя пропорционально интегралу во времени от напряжения сигнала.

Принципиальная схема интегрирующего усилителя приведена на рис. 26. Повышенные требования к стабильности усилителя при

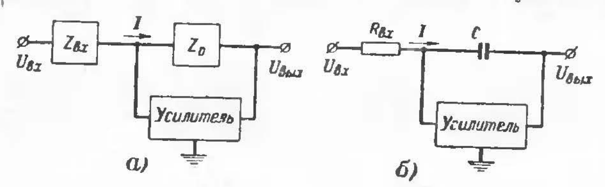


Рис. 25. Интегрирующий усилитель.

а — структурная схема усилителя с обратной связью; *б* — структурная схемв интегрирующего усилителя.

колебаниях напряжения накала заставляют несколько усложнить схему катодной компенсации (рис. 27). Здесь эффект изменения эмиссии катода при колебаниях напряжения накала воспроизведен

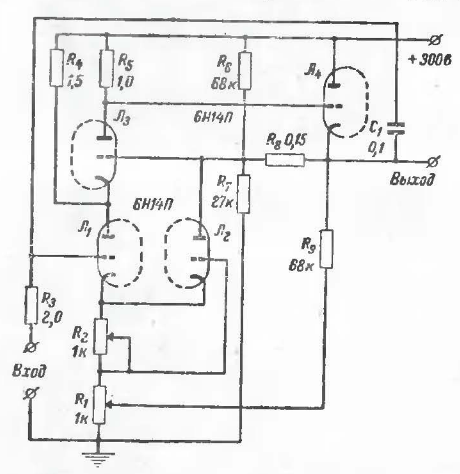


Рис. 26. Схема интегрирующего усилителя.

генератором напряжения ΔE, включенным последовательно с катодом. Компенсация напряжения ΔE достигается падением напряжения на сопротивлении R_2 за счет тока компенсирующей лампы. Эта схема верна при условии, что ток лампы $Л_1$ во много раз меньше тока лампы $Л_2$ и падение напряжения на сопротивлении R_2 определяется в основном током лампы $Л_2$. Величина сопротивления R_2 выбирается из условия

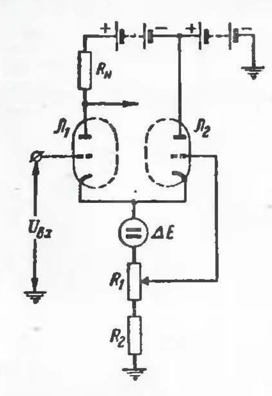


Рис. 27. Катодная компенсация нестабильности напряжения подогревателя.

$$R_2 = k/S_2,$$

где k — коэффициент пропорциональности;

S_2 — крутизна характеристики лампы $Л_2$.

В случае, если лампы $Л_1$ и $Л_2$ имеют одинаковые параметры, $k=1$ и $R_2=1/S$.

Точность выполнения равенства (31) в интегрирующем усилителе тем выше, чем больше коэффициент усиления усилителя постоянного тока. Ошибка интегрирования равна нулю при бесконечном усилении. Это условие и определяет необходимость применения в интегрирующем усилителе каскода. Здесь показан еще один метод повышения усиления каскода путем введения положительной обратной связи. Напряжение положительной обратной связи вводится из катодной цепи лампы $Л_4$ в катод лампы $Л_1$ и величина его регулируется сопротивлением R_1. Выходные характеристики интегрирующего усилителя с положительной обратной связью приведены на рис. 28. Без положительной обратной связи (кривая *А*) характеристика выходного напряжения имеет относительно малую крутизну. Кривая *Б* относится к случаю оптимальной регулировки положительной обратной связи, когда коэффициент усиления каскода (и, следовательно, крутизна выходной характеристики) бесконечно велик. В этом случае соблюдается условие точного интегрирования, и усилитель линейно работает во всем динамическом диапазоне, достигающем 175 *в*. При слишком сильной положительной обратной связи (кривая *В*) возникает участок с отрицательным наклоном. Схема склонна к релаксационным колебаниям.

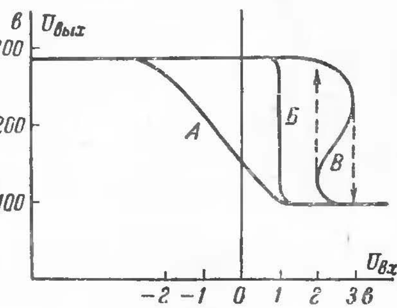


Рис. 28. Выходные характеристики интегрирующего усилителя.

При использовании лишь части динамического диапазона усилителя (20—50 *в*) настройка положительной обратной связи для получения «бесконечного» усиления не критична и допускает небольшие отклонения от точной установки R_1.

16. САМОБАЛАНСИРУЮЩИЙСЯ КАСКОДНЫЙ ФАЗОИНВЕРТОР

Наличие в каскодном усилителе двух управляющих сеток позволяет производить раздельную регулировку анодного тока каскода по каждой из сеток. Эта возможность двойного управления, позво-

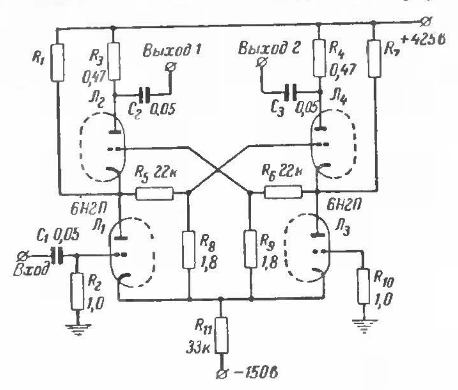


Рис. 29. Самобалансирующийся фазоинвертор с перекрестными связями.

ляющая эффективно изолировать цепи сигнала и обратной связи, широко используется при создании усилителей с положительной или отрицательной обратной связью, избирательных усилителей и т. п.

Из выражения (8) следует, что коэффициент усиления каскода относительно сетки нижней лампы в случае одинаковых ламп равен:

$$k_{c1} = \frac{\mu(\mu+1)R_н}{R_н + (\mu+2)R_i} \approx SR_н. \tag{32}$$

Относительно сетки верхней лампы коэффициент усиления равен:

$$k_{c2} = \frac{\mu R_н}{R_н + (\mu+2)R_i}, \tag{33}$$

т. е. примерно в μ раз меньше k_{c1}. Назначение и особенности усилителя определяют, на какую из сеток (более чувствительную или менее чувствительную) подается основной сигнал, и на какую подается сигнал обратной связи. В избирательных и корректирующих усилителях, где необходимо получить большое усиление в цепи обратной связи, для основного сигнала обычно используется сетка верхней лампы каскода. В обычных усилительных каскадах с обратной связью основной сигнал подается на сетку нижней лампы, а для введения обратной связи используется верхняя сетка.

На рис. 29 приведена схема самобалансирующегося фазоинверсного каскада. Здесь возможность управления каскодом по сетке верхней лампы используется для автоматической балансировки схемы. Для этого введены перекрестные связи по постоянному току сеток верхних ламп с катодами. Сохранение динамического диапазона фазоинверсного каскада и полосы пропускания при одновременном увеличении коэффициента усиления может быть достигнуто увеличением анодного тока нижних триодов каждой пары за счет введения сопротивлений R_1 и R_7, как упоминалось в разделе, посвященном усилителям постоянного тока.

Выполненный по приведенной на рис. 29 схеме усилитель позволяет получить на выходе двухтактное напряжение сигнала с амплитудой 100 *в*. Коэффициент усиления схемы около 500.

17. ИЗБИРАТЕЛЬНЫЙ КАСКОДНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Из всех схем избирательных усилителей наибольшее распространение получили схемы с двойным Т-образным мостом в цепи отрицательной обратной связи. Они отличаются простотой, легкостью настройки и стабильностью параметров. Обычно избирательный мост,

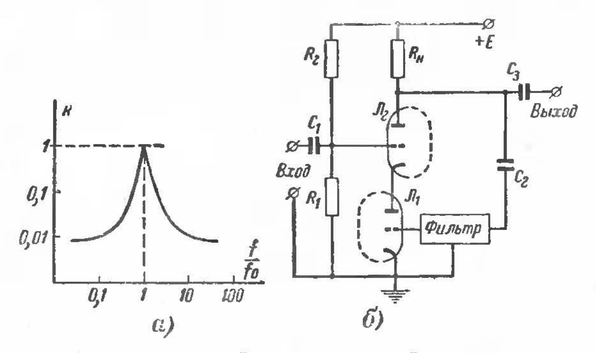


Рис. 30. Каскодный избирательный усилитель.
а — характеристика избирательности; *б* — принципиальная схема.

обладающий частотной характеристикой, внешне напоминающей характеристику резонансного контура, включается между анодом и сеткой усилительного каскада. Частотная характеристика такого избирательного усилителя приведена на рис. 30,*а*. Эквивалентная «добротность» усилителя с двойным Т-образным мостом, называемая обычно его качеством, равна:

$$Q_{э.к} = \frac{f_0}{2\Delta f} \approx \frac{k+1}{4}, \tag{34}$$

где k — коэффициент усиления каскада без цепи обратной связи.

Как видно из формулы, избирательность усилителя зависит от его коэффициента усиления. Сочетание в каскодном усилителе таких качеств, как высокий коэффициент усиления и возможность двойного управления, позволяет создать на его основе избирательный усилитель с весьма высокой избирательностью.

Из уравнений (32) и (33) видно, что для достижения высокого значения эквивалентного качества сигнал обратной связи следует подавать на сетку нижней лампы каскода. Разделение цепей обратной связи и сигнала, который подается на сетку верхней лампы, также способствует повышению избирательности усилителя за счет устранения шунтирующего действия цепи сигнала на избирательный мост. Общая схема избирательного каскодного усилителя приведена на

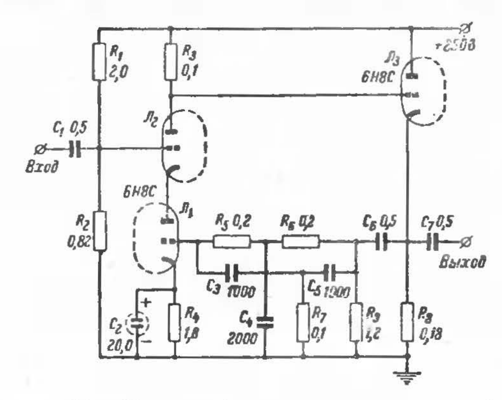


Рис. 31. Каскодный усилитель с высокой избирательностью.

рис. 30,*б*. Эквивалентное качество такого усилителя подсчитывается по формуле

$$Q_{э.к} \approx \frac{S_1 R_н + 1}{4} \approx \frac{S_1 R_н}{4}. \tag{35}$$

Пример практической схемы избирательного каскодного усилителя показан на рис. 31.

Повышение эквивалентного качества в этой схеме достигается также развязкой анодной нагрузки усилителя и избирательного моста посредством катодного повторителя на лампе $Л_3$. Высокое входное сопротивление катодного повторителя позволило повысить сопротивление анодной нагрузки каскода. Помимо буферного действия катодного повторителя, его применение также полезно с точки зрения понижения сопротивления источника сигнала для избирательного моста. Схема рассчитана на выделение сигналов частоты f_0=800 *гц*.

18. ВИДОИЗМЕНЕННЫЕ СХЕМЫ КАСКОДНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Возможно большое количество различных видоизменений основной схемы каскодного усилителя. Эти видоизменения обладают новыми свойствами и параметрами и зачастую теряют некоторые свойства, характерные для каскода. Например, такое изменение каскодной схемы, в котором выходной сигнал снимается не с анода верх-

него триода, а с анода нижнего триода, позволяет получить свойства, характерные для анодного повторителя (рис. 32,*а*). Однако эта схема не обладает некоторыми недостатками обычного анодного повторителя. В частности, она имеет высокое входное сопротив-

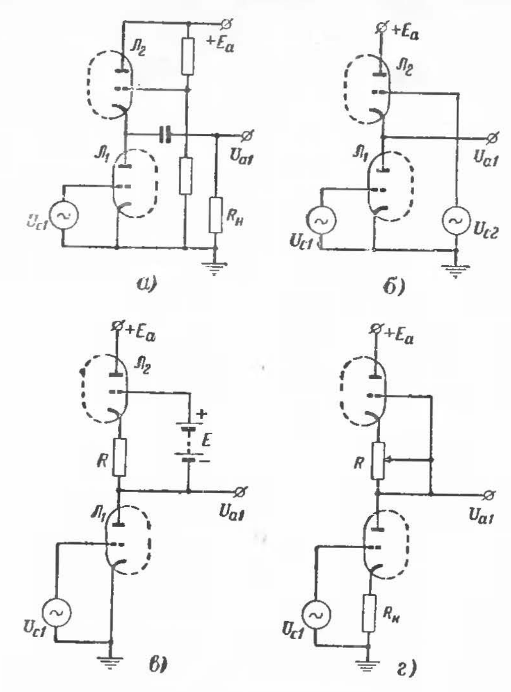


Рис. 32. Видоизменения основной схемы каскодного усилителя.

а — анодный повторитель; *б* — дифференциальный усилитель; *в* — усилитель с высоким усилением; *г* — усилитель с компенсацией нестабильности накала.

ление. В новой схеме отсутствует параллельная обратная связь по напряжению на входе, приводящая к уменьшению входного сопротивления в обычных анодных повторителях. Выходное сопротивление каскодного анодного повторителя равно:

$$R_{вых} \approx \frac{1}{S}.$$

Коэффициент передачи напряжения определяется выражением

$$k = \frac{-\mu}{\mu + 2 + R_i/R_н}. \tag{36}$$

Дальнейшее видоизменение этой схемы может идти по пути введения управления по сетке верхней лампы (рис. 32,*б*). Такая схема является фактически дифференциальным усилителем. Ее выходное напряжение в общем случае определяется выражением

$$U_{\text{вых}} = \frac{\mu_2 R_{i1} U_{c2} - \mu_1 R_{i2} U_{c1}}{R_{i1}(1+\mu_2) + R_{i2}}. \quad (37)$$

Для случая одинаковых ламп $Л_1$ и $Л_2$, являющегося наиболее распространенным, выражение упрощается:

$$U_{\text{вых}} = \frac{\mu}{\mu + 2}(U_{c2} - U_{c1}),$$

или

$$U_{\text{вых}} \approx (U_{c2} - U_{c1})$$

при выполнении условия $\mu \gg 2$.

С возможностью двойного управления связано вообще большое количество видоизменений основной схемы каскода. К таким видоизменениям можно отнести и схемы с обеспечением постоянства анодного тока усилителя (рис. 32,*в*), и схемы с компенсацией нестабильности напряжения подогревателя (рис. 32,*г*).

Из перечисленных схем наибольший интерес представляет схема с постоянным анодным током усилителя, иллюстрирующая еще одну возможность повышения коэффициента усиления. Как упоминалось выше, возможность повышения усиления в узкополосных усилителях за счет увеличения сопротивления анодной нагрузки ограничена предельным значением напряжения источника питания. Однако если выходное напряжение снимать с анода нижнего триода, а верхний триод использовать в качестве нагрузки, то получаются совершенно новые свойства. Здесь верхний триод, работая в качестве катодного повторителя, воспроизводит на катоде напряжение дополнительной батареи *E*, включенной между его катодом и сеткой. Анодный ток такой схемы может быть записан в следующем виде:

$$I_a = \frac{E_a - U_{a1} + \mu_2 E}{R_{i2} + (\mu_2 + 1) R_1}. \quad (38)$$

Таким образом, верхний триод эквивалентен сопротивлению, имеющему величину:

$$R' = R_{i2} + (\mu_2 + 1) R, \quad (39)$$

присоединенному к эквивалентному источнику анодного питания с напряжением

$$E'_a = E_a + \mu_2 E. \quad (40)$$

Это означает, что напряжение источника питания как бы увеличивается на величину $\mu_2 E$. Соответственно может быть увеличен и коэффициент усиления схемы. В качестве примера можно привести

схему, в которой использованы пентод $Л_1$ и триод $Л_2$ (рис. 33,*б*). Выходные характеристики такого усилителя (кривая *А*) и обычного усилителя на пентоде (кривая *Б*) приведены на рис. 33,*а*. В пентодном усилителе, анодной нагрузкой которого является триод, усиление достигает 7 000, в то время как в обычном пентодном усилителе максимальное усиление не превышает 600.

В отличие от описанной схемы с постоянным анодным током усилителя в очень похожей на нее схеме усилителя постоянного тока с компенсацией нестабильности напряжения подогревателя (рис. 32,*г*)

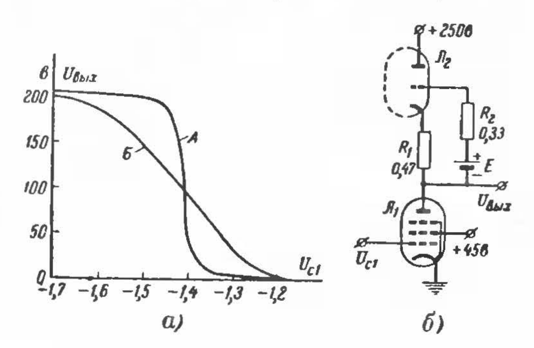


Рис. 33. Усилнтель с высоким усилением.
а — выходные характернстнки; *б* — принципиальная схема.

нет источника постоянного смещения верхней лампы $Л_2$. Однако и здесь верхняя лампа выполняет роль нагрузочного сопротивления для усилительной лампы $Л_1$. Схема не позволяет получить высокие значения усиления из-за ограниченной величины напряжения анодного питания, так как фиктивного повышения напряжения питания за счет дополнительного источника (как в предыдущей схеме) здесь нет. Интересен этот усилитель тем, что изменение анодного тока усилительной лампы $Л_1$ за счет колебаний напряжения подогревателя не вызывает в нем изменения постоянного потенциала анода $Л_1$.

Если обе лампы обладают одинаковыми параметрами, и сигнал на сетку нижней лампы не подается, то при условии равенства катодных сопротивлений верхней и нижней ламп $R = R_к$ напряжение выхода будет:

$$U_{a1} = \frac{E_a}{2}.$$

При подаче на сетку нижней лампы $Л_1$ сигнала напряжение выхода будет изменяться по закону:

$$U_{a1} = \frac{\{[R_i + (\mu+1) R_к]/[R_i + (\mu+1) R]\} E_a - \mu U_{c1}}{1 + \{[R_i + (\mu+1) R_к]/[R_i + (\mu+1) R]\}}, \quad (41)$$

или

$$U_{a1} = \frac{E}{2} - \frac{\mu U_{c1}}{2}$$

при $R_к = R$.

Таким образом, усиление схемы равно $\frac{\mu}{2}$. Выходное напряжение линейно относительно U_{c1}, так как в выражении для него отсутствует значение внутреннего сопротивления. Однако последнее справедливо лишь при условии применения одинаковых триодов.

При равенстве катодных сопротивлений верхней и нижней ламп выходное сопротивление схемы равно:

$$R_{\text{вых}} = \frac{R_i + (\mu + 1) R_{\text{к}}}{2}. \quad (42)$$

Компенсация в схеме объясняется тем, что при изменении напряжения подогревателя в равной степени изменяются анодные токи верхней и нижней ламп. Внутренние сопротивления ламп изменяются на одинаковую величину и, следовательно, напряжение на аноде лампы $Л_1$ остается всегда постоянным. Таким образом, в схеме верхняя лампа используется как анодная нагрузка для лампы $Л_1$, величина которой автоматически изменяется в такт с изменением внутреннего сопротивления усилительной лампы $Л_1$ при колебаниях напряжения питания. Если триоды $Л_1$ и $Л_2$ имеют различные характеристики по напряжению накала, то влияние колебаний напряжения может быть устранено соответствующим выбором соотношения сопротивлений R и $R_{\text{к}}$.

19. КАТОДНЫЙ ПОВТОРИТЕЛЬ КАСКОДНОГО ТИПА

Первоначально термин «каскодный усилитель» относился к двухламповым усилителям, собранным по основной схеме. Однако сейчас он приобретает более широкий смысл и, в частности, охватывает двухламповые усилители с катодной нагрузкой, роль которой выполняет одна из ламп. В качестве исходной схемы катодного повторителя каскодного типа используется схема катодного повторителя с нагрузкой, обеспечивающей постоянство анодного тока. Такая схема приведена на рис. 34,*а*. Одним из основных преимуществ катодного повторителя с постоянным током нагрузки является повышенная линейность его выходной характеристики. Как известно, величина μ многих триодов практически не зависит от напряжения на аноде триода при постоянном анодном токе. Следовательно, если создать катодное сопротивление, обеспечивающее постоянство анодного тока триода, то задача повышения линейности будет решена. В качестве нижней лампы, обеспечивающей постоянство тока, может быть применен как триод, так и пентод. Применение пентода основано на том, что анодный ток пентода почти не зависит от напряжения на его аноде. Его величина определяется лишь сопротивлением автоматического смещения и потенциалом на экранирующей сетке. Последний должен иметь возможно меньшее значение, так как при падении анодного напряжения до уровня напряжения на экранирующей сетке происходит перераспределение токов между цепью анода и цепью экранирующей сетки. Большая часть тока начинает протекать через цепь экранирующей сетки. Тогда вследствие изменения смещения анодный ток уменьшится.

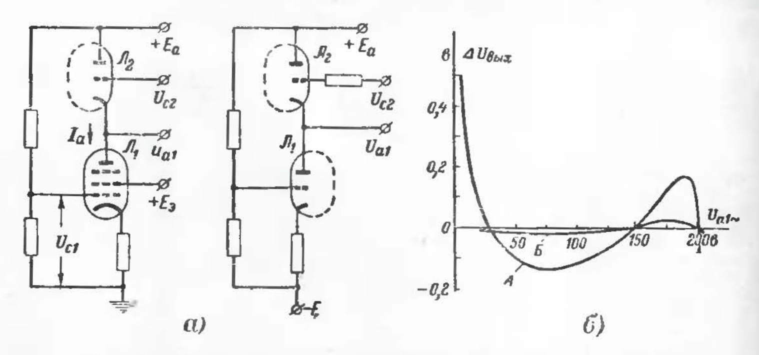


Рис. 34. Схема катодного повторителя каскодного типа.
а — принципиальная схема; *б* — выходные характеристики линейности.

В том случае, когда в качестве катодной нагрузки используется триод, уравнение его анодного тока может быть записано в виде:

$$I_{\text{а}} = \frac{U_{\text{а}1} + \mu U_{\text{c}1}}{R_i + (\mu + 1) R_{\text{к}}}, \quad (43)$$

если он работает в режиме малых сеточных токов, когда $U_{\text{а}1} \gg U_{\text{c}1}$. Тогда эквивалентное сопротивление нагрузочного триода будет равно:

$$R' = R_i + (\mu + 1) R_{\text{к}}. \quad (44)$$

Триодная схема обеспечения постоянства анодного тока обладает значительно большей устойчивостью в отношении дрейфа за счет колебаний напряжения подогревателя, чем пентодная схема. Это объясняется тем, что в пентодной схеме при изменении напряжения подогревателя смещение на катодном сопротивлении R изменяется не только за счет анодного тока, но и за счет тока экранирующей сетки.

Повышение линейности катодного повторителя за счет применения схемы, обеспечивающей постоянство анодного тока, наглядно видно при рассмотрении характеристик нелинейности в динамическом диапазоне, изображенных на рис. 34,*б*. Кривая *А* показывает отклонение от линейности выходной характеристики при изменении выходного напряжения для обычного катодного повторителя, кривая *Б* — для катодного повторителя с постоянным током.

При применении указанного устройства выходное полное сопротивление катодного повторителя, как и в обычном катодном повторителе, равно обратной величине крутизны характеристики верхней лампы.

Помимо расширения динамического диапазона линейной работы,

такой катодный повторитель отличается от обычного еще одним свойством. Как известно, в обычном катодном повторителе протекающий через катодное сопротивление ток уменьшается по мере уменьшения напряжения на катоде. Это приводит к искажению отрицательных фронтов импульсов, пропускаемых через катодный повторитель, за счет неравномерности перезаряда емкости, шунтирующей нагрузку. В каскодном катодном повторителе постоянный ток нагрузки в динамическом диапазоне обеспечивает постоянную скорость нарастания быстрых отрицательных перепадов напряжения для любых напряжений в пределах динамического диапазона.

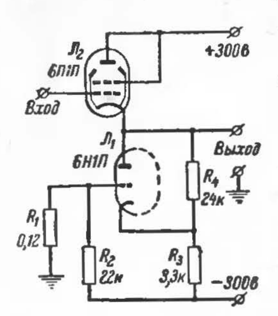


Рис. 35. Экономичный катодный повторитель.

Применение в качестве катодного сопротивления электронной лампы, обеспечивающей постоянство тока через нее, имеет и еще одно преимущество, особенно существенное в устройствах, где применяется большое количество катодных повторителей, например в вычислительных машинах. Это преимущество — экономичность такого катодного повторителя. Дело в том, что при передаче катодным повторителем больших положительных напряжений в нем расходуется избыточная мощность за счет увеличения тока через катодное сопротивление. В катодном повторителе каскодного типа ток через катодное сопротивление постоянен при любых значениях напряжения на катоде. В результате этого рассеиваемая на катодном сопротивлении (в данном случае на нижней лампе) мощность уменьшается примерно на 30%.

Схема каскодного катодного повторителя с пониженным потреблением мощности показана на рис. 35.

Для уменьшения рассеиваемой на нижней лампе мощности она шунтирована сопротивлением R_4. Это позволяет применить в качестве $Л_1$ маломощную лампу, так как на сопротивлении рассеивается часть мощности. С делителя R_1—R_2 на сетку лампы $Л_1$ подается фиксированное напряжение смещения. Катод лампы $Л_1$ соединен с делителем напряжения, составленным из сопротивлений R_3 и R_4. Таким образом, относительно фиксированного потенциала сетки потенциал катода лампы $Л_1$ изменяется в соответствии с изменением выходного напряжения. При увеличении напряжения на катоде лампы $Л_2$, т. е. выходного напряжения, за счет повышения напряжения на катоде $Л_1$ ее анодный ток уменьшается в такой степени, как увеличивается ток через сопротивления R_3—R_4. Суммарный ток через $Л_1$ и сопротивления R_3—R_4, являющийся катодным током $Л_2$, остается примерно постоянным.

20. ИМПУЛЬСНЫЙ КАТОДНЫЙ ПОВТОРИТЕЛЬ

Выше упоминалось, что обычные катодные повторители искажают отрицательный фронт импульса, пропускаемого через них. Этот недостаток устраняется в каскодном катодном повторителе введением стопроцентной обратной связи. Схема катодного повторителя, не искажающего отрицательные импульсы и отличающегося очень низким выходным сопротивлением, приведена на рис. 36,*а*. Образовалась эта схема из двухкаскадного усилителя (рис. 36,*б*). Для эффективной работы усилителя $R_к$ должно быть достаточно большим, чтобы не шунтировать анодную цепь лампы $Л_1$. В окончательной схеме (рис. 36,*а*) роль этого сопротивления играет сама лампа $Л_1$, включенная в катодную цепь лампы $Л_2$.

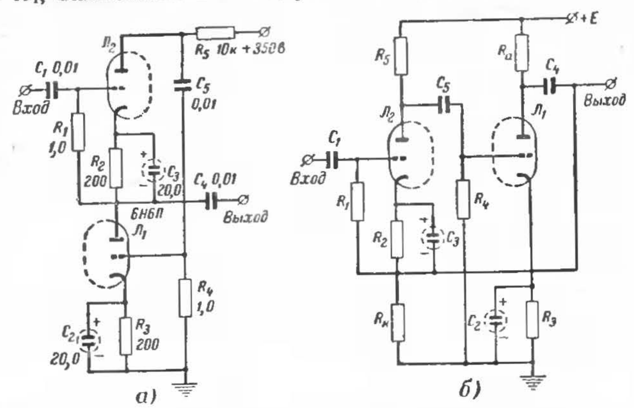


Рис. 36. Импульсный катодный повторитель.
а — принципиальная схема; *б* — исходная схема.

Выходная проводимость при одинаковых лампах $Л_1$ и $Л_2$ определяется выражением

$$G_{вых} \approx (\mu^2 + \mu + 1)/R_i \approx \mu S \quad (45)$$

или для разных ламп

$$G_{вых} = \mu_1 \mu_2 / R_{i1}. \quad (46)$$

Таким образом, выходная проводимость определяется величиной μ.

При изменении частоты подаваемого на катодный повторитель сигнала от 10 *кгц* до 30 *Мгц* коэффициент передачи каскада приблизительно равен единице при нагрузке 1 *ком*.

21. КАТОДНЫЙ ПОВТОРИТЕЛЬ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ВХОДНОЙ ЕМКОСТИ

В ряде электронных схем необходимо применение катодных повторителей с очень большими величинами входных сопротивлений и малыми емкостями. На низких частотах, где влияние входной емкости лампы мало, получить большие входные сопротивления — до 10^9—10^{10} *ом* относительно легко. Однако уже на частоте 5 000 *гц* шунтирующая емкость величины 3,2 *пф* имеет емкостное сопротив-

ление лишь 10^7 *ом*. Следовательно, для получения входных сопротивлений более 10^7 *ом* необходимо выполнение условия $C_{вх}<3$ *пф*. В то же время чрезвычайно большие сопротивления входа требуют тщательной экранировки входного кабеля. Одним из методов решения этой проблемы является питание экрана входного кабеля напряжением той же амплитуды и фазы, что и входной сигнал. При выполнении этого условия между экраном и входом лампы не будет приложено напряжение сигнала, следовательно, не будет протекать ток сигнала, и паразитная емкость не будет влиять на входное сопротивление.

Входная емкость катодного повторителя равна:

$$C_{вх} = C_{с.а} + (1 - k) C_{с.к} + C_{с.о}, \tag{47}$$

где $C_{с.а}$ — емкость между сеткой и анодом;

$C_{с.к}$ — емкость между сеткой и катодом;

$C_{с.о}$ — емкость между сеткой и землей.

Устранение емкости $C_{с.а}$ также может быть произведено подачей на анод катодного повторителя напряжения, по амплитуде и фазе подобного напряжению сигнала.

При использовании в качестве генераторов компенсирующего напряжения катодных повторителей обычного типа, коэффициент передачи которых меньше единицы, полной компенсации входной емкости достичь не удается. Даже в том случае, когда коэффициент передачи равен единице, остается нескомпенсированной входная емкость, обусловленная емкостью $C_{с.о}$.

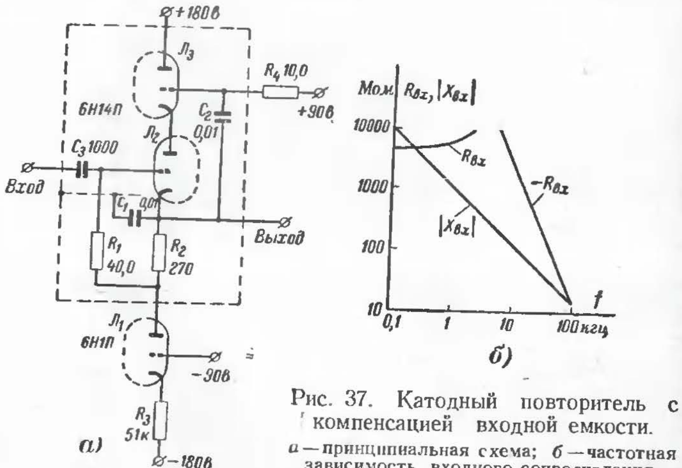


Рис. 37. Катодный повторитель с компенсацией входной емкости.
а — принципиальная схема; *б* — частотная зависимость входного сопротивления.

В схеме, приведенной на рис. 37,*а* для получения высокого коэффициента передачи, весьма близкого к единице, для катодных повторителей сигнала компенсации использовано каскодное включение ламп В катодном повторителе с очень большим входным сопротивлением на лампе $Л_2$ в качестве катодного сопротивления

используется электронная лампа $Л_1$ обеспечивающая постоянство тока. Эта лампа эквивалентна очень большому сопротивлению, что необходимо для приближения коэффициента передачи лампы $Л_2$ к единице.

Тщательным экранированием ввода сетки $Л_2$ удается снизить емкость $C_{с.о}$. Сигнал для компенсации емкости $C_{с.к}$, в которую входит и емкость между сеточным вводом и экраном, берется с катода лампы $Л_2$ через емкость C_1. Нескомпенсированной остается лишь часть емкости между вводом и землей в том месте, где ввод нельзя заэкранировать, например в баллоне лампы. Здесь существуют весьма малые емкости между вводом сетки и вводом подогревателя.

Для подачи компенсирующего сигнала на анод $Л_2$ используется катодный повторитель на лампе $Л_3$, соединенной последовательно с лампой $Л_2$. Для лампы $Л_3$ лампа $Л_2$ является катодной нагрузкой, что делает коэффициент передачи лампы $Л_3$ также весьма близким к единице. Поэтому на ее катоде, соединенном непосредственно с анодом лампы $Л_2$, присутствует сигнал, практически равный по амплитуде и фазе сигналу на катоде лампы $Л_2$. На сетку лампы $Л_3$ сигнал компенсации поступает через емкость C_2.

Получение эффективной компенсации входной емкости в этой схеме возможно лишь при тщательной экранировке не только ввода сетки лампы $Л_2$, но и ламп $Л_2$ и $Л_3$. Для уменьшения собственных шумов следует применять в качестве ламп $Л_3$ и $Л_2$ малошумящие лампы.

На рис. 37,*б* показана зависимость входного активного и реактивного сопротивлений схемы от частоты при подключении ко входу коаксиального кабеля длиной 37 *см*.

Входную емкость можно записать, как:

$$C_{вх} = (1 - k_2) C_{с.а} + (1 - k_1) C_{с.к} + C_{с.о}, \tag{48}$$

где k_1 и k_2 — соответственно коэффициенты передачи цепей компенсации емкостей $C_{с.к}$ и $C_{с.а}$.

При применении рассмотренной схемы принципиально невозможно получить полную компенсацию входной емкости. Однако при некотором усложнении схемы, заключающемся во введении дополнительного усилителя для получения значений k_2, превышающих единицу, принципиально возможно полностью компенсировать входную емкость каскодного катодного повторителя. Практически установлено, что для компенсации потерь в схеме должно выполняться условие $k_2 \geqslant 1{,}2$. Тогда за счет увеличения амплитуды компенсирующего напряжения на аноде лампы $Л_2$ k_1 становится также больше единицы, а эффективное входное сопротивление уменьшается до значения 10^9 *ом* на всех частотах.

22. КАТОДНЫЙ ПОВТОРИТЕЛЬ С КОЭФФИЦИЕНТОМ ПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЯ, РАВНЫМ ЕДИНИЦЕ

Нередко к используемым в различных устройствах электронным схемам предъявляется требование очень высокой точности воспроизведения подаваемого на них сигнала. В катодном повторителе это требование выполняется при условии получения бесконечно большого сопротивления катодной нагрузки.

В изображенной на рис. 38,*а* схеме катодного повторителя каскодного типа компенсация потерь в катодной цепи, создаваемых конечной величиной катодного сопротивления и сопротивления входной цепи последующего каскада, достигается введением положительной обратной связи через лампу $Л_2$.

Напряжение сигнала с выхода каскодного катодного повторителя, выполненного на лампах $Л_1$ и $Л_3$, подается на согласующий

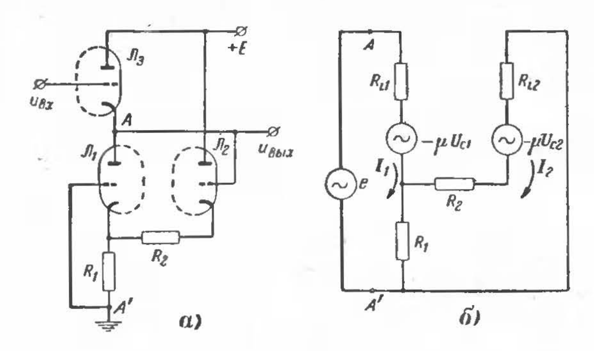


Рис. 38. Катодный повторитель с коэффициентом передачи напряжения, равным единице.
а — принципиальная схема; *б* — эквивалентная схема.

усилитель на лампе $Л_2$, предназначенный для согласования сопротивления анодной цепи лампы $Л_1$, с сопротивлением ее катодной цепи в петле положительной обратной связи.

Согласующий усилитель является катодным повторителем на лампе $Л_2$. Коэффициент передачи напряжения в замыкаемой им петле обратной связи выбирается регулировкой величины сопротивления R_2, составляющего с постоянным сопротивлением R_1 делитель сигнала обратной связи.

Для определения условий, при которых сопротивление в катодной цепи лампы $Л_3$ (между точками A и A') принимает бесконечное значение, рассмотрим эквивалентную схему устройства (рис. 38,*б*).

Лампа $Л_3$ здесь заменена генератором напряжения e. Полное сопротивление R_i, являющееся катодной нагрузкой лампы $Л_3$ (между точками A и A' эквивалентной схемы) находится решением системы уравнений для токов I_1 и I_2.

Опустив промежуточные выкладки, получим выражение для полного сопротивления R_i:

$$R_i = \frac{e}{I_1} = R_{i1} + (\mu_1 + 1) R_1 \left\{ \frac{1 + R_{i1}\mu_2/[R_{i2} + R_2(\mu_2 + 1)]}{1 - R_1(\mu_1\mu_2 - 1)/[R_{i2} + R_2(\mu_2 + 1)]} \right\}. \quad (49)$$

Применяемые в подобных схемах триоды обычно имеют достаточно высокое значение μ, так что выполняется условие $\mu_1 \gg 1$ и $\mu_2 \gg 1$.

Тогда уравнение (49) можно упростить:

$$R_i = R_{i1} + \frac{\mu_1 R_1 [1 + S_2(R_2 + R_{i2})]}{1 + S_2(R_2 - \mu_1 R_1)}. \quad (50)$$

Наибольший интерес представляет выражение для R_2, из которого можно получить условия настройки схемы. Найдем выражение для R_2 из уравнения (49):

$$R_2 = \frac{R_1}{\mu_2 + 1} \cdot \frac{R_i(\mu_1\mu_2 - 1) + R_{i1}(\mu_2 + 1)}{R_i - R_{i1} - R_1(\mu_1 + 1)} - \frac{R_{i2}}{\mu_2 + 1}.$$

При выполнении условия $\mu_1 \gg 1$; $\mu_2 \gg 1$ это выражение упрощается и приобретает вид:

$$R_2 \approx \frac{R_1(\mu_1 R_1 + R_{i1})}{R_i - R_{i1} - \mu_1 R_1} - \frac{1}{S_2}.$$

Анализ последнего выражения показывает, что для получения бесконечной величины сопротивления R_i должно выполняться условие

$$R_2 = \mu_1 R_1 - \frac{1}{S_2} = R_{2\infty}. \quad (51)$$

При $R_2 > R_{2\infty}$ полное сопротивление R_i принимает положительные значения, при $R_2 < R_{2\infty}$ — отрицательные значения.

В практических случаях величина сопротивления R_1 в катодной цепи лампы $Л_1$ выбирается по возможности большей. Сопротивление R_2 берется таким, чтобы его величина удовлетворяла условию получения необходимого полного сопротивления R_i. Для компенсации емкости в катодной цепи $Л_1$ параллельно сопротивлению R_2 обычно включается небольшая емкость.

Коэффициент передачи каскодного катодного повторителя с катодной нагрузкой, образованной лампами $Л_1$ и $Л_2$, равен:

$$k = \frac{\mu R_i}{R_{i3} + (\mu + 1) R_i}, \quad (52)$$

где R_{i3} — внутреннее сопротивление верхней лампы $Л_3$.

При выполнении условия $R_i = R_{i3}$ коэффициент передачи такого катодного повторителя становится равным единице.